NATIONAL GEOGRAPHIC

LA COLONIZACIÓN ESPACIAL

El futuro de la humanidad en el cosmos

Las décadas de exploración espacial desde el lanzamiento del primer Sputnik han permitido desarrollar la tecnología hasta límites insospechados y conocer con gran detalle el sistema solar. Hoy en día disponemos de asentamientos en el espacio habitados de forma continua, de naves movidas por nuevos tipos de motores, de cohetes que aterrizan solos y de sondas que toman sus propias decisiones. La tecnología está por fin madura para poder afrontar con éxito los retos de la colonización espacial. Pronto pasaremos a ser una especie multiplanetaria, algo que cambiará y enriquecerá nuestra cultura de una manera que aún no podemos prever, y que será clave para nuestra supervivencia a largo plazo.

Fernando J. Ballesteros es doctor en física, astrónomo y divulgador científico.

LA COLONIZACIÓN ESPACIAL

El futuro de la humanidad en el cosmos

SUMARIO

Introducción 7

01 **Abandonar la cuna** 13

02 **Cómo salir de la Tierra** 39

03 **Adaptarse al espacio** 73

04 **La colonización del sistema solar** 103

Lecturas recomendadas 137

Índice 139

INTRODUCCIÓN

La colonización de otros mundos comenzó a ser una posibilidad en 1609, cuando Galileo apuntó por primera vez su telescopio hacia la Luna y descubrió que, contrariamente a lo que se creía en esa época, nuestro satélite tiene valles y montañas que forman un paisaje no tan distinto del terrestre. Con la construcción de telescopios cada vez más potentes, algo parecido pasó a principios del siglo XX con Marte, en el que se detectaron cambios estacionales y un día de una duración muy similar al de la Tierra. La Luna y Marte pasaron de verse como cuerpos astronómicos inalcanzables a ser considerados destinos a los que llegar. La lógica indicaba que lo mismo ocurría con los restantes planetas y satélites del sistema solar.

La ciencia ficción convirtió los viajes interplanetarios en uno de sus temas recurrentes y autores como H. G. Wells y Jules Verne usaron los conocimientos científicos de su época para dar verosimilitud a sus relatos, que sirvieron de fuente de inspiración para los estudios de Konstantín Tsiolkovski, el padre de la astronáutica. Los viajes espaciales fueron convertidos en realidad gracias a ingenieros como Robert Goddard, Serguéi Koroliov o Wernher von

Braun, que compartieron la pasión por hacer avanzar a la humanidad hacia el espacio exterior, trabajando en el desarrollo de cohetes capaces de impulsar ese sueño. Los vuelos pioneros de Gagarin o Shepard demostraron que, con el equipamiento adecuado, el ser humano puede sobrevivir en las condiciones de las regiones más allá de la atmósfera terrestre, y que las expediciones tripuladas a otros planetas no eran un imposible. En 1969 Armstrong y Aldrin lo confirmaron cuando se convirtieron en los primeros seres humanos en poner un pie sobre la superficie de otro mundo. Siete años después y a una distancia casi un millón de veces mayor, las sondas *Viking* se posaron en Marte y mandaron las primeras imágenes de su superficie, mostrando un paisaje reconocible. Carl Sagan expresó el impacto y el significado de ese hito: «Recuerdo que me quedé asombrado ante la primera imagen del vehículo de aterrizaje que mostraba el horizonte de Marte. Aquello no era un mundo extraño, pensé; conocía lugares como aquel en Arizona, en Colorado y en Nevada. Había rocas y arena acumulada y una colina en la distancia, todo tan natural y espontáneo como cualquier paisaje de la Tierra. Marte era un lugar».

Llegar a otros mundos y establecer colonias en ellos es posiblemente la empresa más ambiciosa que se haya propuesto nunca la humanidad, pero también la más difícil y arriesgada. ¿Por qué, entonces, comprometerse con semejante reto, dedicándole esfuerzos y recursos ingentes? La respuesta es simple: porque es crucial para nuestro futuro. La colonización espacial es el siguiente paso en el proceso de expansión que recorre la historia del ser humano, que ha permitido que nuestra especie haya sobrevivido a cualquier catástrofe local. Las colonias espaciales son, a muy largo plazo, la mejor garantía para la continuidad de la humanidad, frente a una alternativa —la de permanecer confinada en la Tierra— que cada vez se muestra menos atractiva.

Ya se han dado los primeros pasos. La exploración preliminar que hemos iniciado del sistema solar, nuestro entorno espacial,

ha proporcionado descubrimientos científicos inesperados, como la constatación de que Venus, planeta con un tamaño similar a la Tierra y que se creía habitable, resulta ser un infierno a causa de un efecto invernadero extremo, la evidencia de que el Marte prehistórico era aún más similar a la Tierra, con océanos de agua, y las pruebas de que algunas de las lunas de Júpiter y Saturno poseen en la actualidad enormes depósitos subterráneos de agua líquida, o la inesperada sorpresa de un mundo alrededor de Saturno, su satélite Titán, con paisajes parecidos a los terrestres, con lluvias, ríos y mares, aunque no de agua.

Los programas espaciales han sido también el banco de pruebas de nuevos desarrollos tecnológicos, que estamos aplicando en nuestra vida cotidiana: hoy contamos con materiales y dispositivos nacidos para la carrera espacial y con las numerosas aplicaciones de los satélites artificiales. Por sí solos, estos avances justifican la exploración espacial, y a ellos se sumarán en el futuro las posibilidades económicas de nuevas fuentes de recursos, como algunos asteroides tan ricos en minerales que ninguna mina terrestre podría igualar. Las colonias espaciales prometen acceso a esos recursos y, en el proceso, a descubrimientos científicos que hoy solo se pueden imaginar.

Algunas de las técnicas que serán imprescindibles para establecer colonias fuera de la Tierra son una realidad. Por ejemplo, se ha conseguido crear entornos seguros para el mantenimiento prolongado de la vida humana en el espacio, como la Estación Espacial Internacional, con una tripulación permanente de seis astronautas. En la misma línea, los trajes espaciales han hecho posible trabajar con comodidad en el vacío durante largos períodos y bajo cambios de temperatura de centenares de grados que se producen en pocos segundos. Gracias a estas experiencias estamos comenzando a comprender y solucionar los riesgos para la salud de la vida en el espacio, de la ingravidez o de la alta radiación ambiente de la que estamos tan protegidos en la Tierra. Acumulamos también expe-

riencia sobre cómo funcionan los ecosistemas cerrados y no parece lejano el momento en el que seamos capaces de crear un habitáculo autónomo que pueda acoger de forma indefinida a seres humanos donde todos los desechos se reciclen, el aire se renueve sin necesitar aportes externos y los alimentos se generen en su interior, a modo de pequeñas Tierras en miniatura.

Para la exploración y colonización del sistema solar se ha tenido que averiguar cómo maniobrar entre los planetas, sacando partido de sus posiciones orbitales, cómo aterrizar con seguridad en las superficies de cuerpos celestes, y cómo preparar con un alto grado de precisión los viajes de sondas hacia el espacio profundo. Aunque la tecnología actual de cohetes está bien establecida, será necesario diseñar nuevas naves y sistemas de propulsión que reduzcan los tiempos de navegación, con consumos de combustible optimizados. Se trata de nuevos enfoques que ya están en las mesas de diseño o bajo la forma de prototipos, y que se propulsarán por la radiación solar, plasmas acelerados o reacciones nucleares de alta potencia.

La superación de estos retos tecnológicos conducirá a la posibilidad de establecer poblaciones humanas de forma permanente en otros mundos. La Luna parece la candidata más probable a corto plazo y los proyectos para establecer las primeras bases están muy avanzados. El primer viaje tripulado a Marte es cada vez más probable, sobre todo desde que iniciativas privadas se han unido a esta nueva competición por alcanzar el planeta rojo. El éxito de bases marcianas estables dependerá en buena parte de las experiencias obtenidas en las lunares y la tecnología que se desarrolle allí, contando con actividades como la minería lunar, que puede ser un factor esencial para el éxito de estas empresas.

Tampoco parece muy distante la posibilidad de establecer ciudades en órbita alrededor de la Tierra, gigantescas estaciones espaciales que sirvan de espaciopuerto, de centros de investigación e incluso de residencia habitual para una población pionera. A largo plazo, hay más lugares en el sistema solar que podrían acoger colo-

nias humanas, algunas en emplazamientos que pueden parecer extremadamente inhóspitos, pero que ofrecen recursos inigualables, como los océanos de agua líquida o de hidrocarburos de algunas lunas de los planetas gigantes.

El espacio no es solo una frontera física, es también una frontera mental, de aquello que creemos que podemos o no podemos hacer. ¿Nos atreveremos a dar el paso y cruzarla? ¿Nos asomaremos a lugares a los que aún no hemos viajado? Tras una pausa de décadas tras la llegada a la Luna, durante la que la exploración de los planetas estuvo limitada a sondas robóticas, surgen nuevos objetivos y nuevas fuentes de inspiración para futuras generaciones de exploradores. La colonización espacial es la épica definitiva y la humanidad aún no ha realizado sus mejores hazañas en este campo, sino solo los primeros pasos.

01 ABANDONAR LA CUNA

El espacio es, en muchos sentidos, la última frontera, la que determinará el futuro de la humanidad. Tras décadas de exploración y consolidación, la tecnología está lista para comenzar a colonizar el espacio. Los beneficios ya producidos por la exploración espacial son inmensos, pero los que promete la colonización cambiarán por completo nuestra sociedad.

El 4 de octubre de 1957 tuvo lugar un hecho que marcó un hito en la historia de la humanidad: la señal de un pitido intermitente cruzó la atmósfera terrestre y dirigió la atención de todo el mundo hacia el espacio. Se trataba de la baliza del *Sputnik I*, la prueba, en forma de ondas de radio, de que la puesta en órbita del primer satélite artificial de la historia había sido un éxito. Se puso así inicio al gran sueño de Konstantín Tsiolkovski, el padre de la astronáutica, un genio visionario que a principios del siglo XX comprendió y enfrentó desde un punto de vista teórico muchos de los problemas y desafíos de la futura exploración espacial.

Hace miles de años, los seres humanos empezaron a colonizar el planeta, en un proceso de expansión que consolidó nuestro desarrollo como especie y generó una gran diversidad cultural. La exploración y colonización del espacio que le rodea ha sido una constante de la humanidad. Durante el siglo XX, se consiguió alcanzar los últimos rincones del globo a los que aún no se había llegado: el paso del Noroeste en 1906, el Polo Norte en 1909, el Polo Sur en 1911, la cima del Everest en 1953 y la fosa de las Marianas en 1960.

Una vez conquistados los puntos más inaccesibles del planeta, el espacio tomó el relevo como la nueva frontera.

Estados Unidos y la URSS emprendieron lo que se conoció como *carrera espacial*, una competición no declarada por la supremacía en el espacio. Si los primeros éxitos los obtuvo la astronáutica soviética, el logro más destacado corrió por cuenta de la NASA, que consiguió el primer alunizaje tripulado de la historia. Tras este hito, las misiones tripuladas cedieron la mayor parte del protagonismo a las sondas automáticas, que durante las últimas décadas del siglo XX y las primeras del siglo XXI llevaron la exploración del sistema solar cada vez más lejos.

¿QUÉ NOS IMPULSA A SALIR DE LA TIERRA?

La única forma de crecer es a través de nuevas ideas y experiencias: tan pronto como dejamos de admitir lo nuevo, dejamos de crecer. Los humanos somos exploradores, por ello estamos abocados a convertirnos en una especie multiplanetaria. La exploración del espacio es importante para la humanidad, esencial incluso, por muchas razones: nutre nuestro deseo de desafiar los límites, amplía nuestros horizontes, nos impulsa a ver las cosas desde puntos de vista revolucionarios, alimenta nuestra curiosidad y favorece una visión optimista del futuro. En definitiva, moviliza lo mejor de nosotros mismos.

La exploración espacial es una empresa en la que la cooperación consigue borrar fronteras. A lo largo de su historia, las agencias espaciales de los diferentes países han incrementado su colaboración para llevar a cabo misiones espaciales complejas, demostrando que el trabajo conjunto es capaz de logros de otra manera imposibles. Los astronautas de las misiones *Apollo* comentaban con frecuencia que, en sus giras internacionales tras las misiones, en todo el mundo la gente les decía qué orgullosos estaban porque «fuimos» a la Luna, ex-

presando de esta manera el sentimiento de que la conquista de nuestro satélite no fue solo privilegio de Estados Unidos, sino de toda la humanidad. Las misiones espaciales permitieron ver la Tierra como un todo, como un pequeño planeta azul sin fronteras.

Los retos que se han debido superar durante más de medio siglo de misiones espaciales han producido un flujo continuo de beneficios para la sociedad, en especial en forma de desarrollos tecnológicos que luego han encontrado aplicación en nuestra vida cotidiana. A esto hay que sumar que la exploración del espacio puede tener también la clave de nuestra supervivencia: la población de la Tierra se duplica cada cuarenta años, mientras que los recursos del planeta son limitados, y aunque las nuevas tecnologías puedan ayudar a explotarlos de forma más eficaz, las previsiones indican que pronto se alcanzarán los límites del sistema. Esto no quiere decir que establecer colonias en otros mundos solucione el aumento de población: la superficie utilizable de Marte es equivalente a la de la Tierra, de manera que una colonización completa del planeta rojo doblaría la superficie habitable por humanos. Sin embargo, este incremento quedaría superado en las cuatro décadas que tarda la población en duplicarse. Así pues, para tener mejores probabilidades de sobrevivir, la colonización humana ha de ir todavía más lejos. Cuantos más mundos habite el ser humano, mayores serán las probabilidades de que siga existiendo a largo plazo.

> La Tierra es la cuna de la humanidad, pero no se puede vivir en la cuna para siempre.
>
> Konstantín Tsiolkovski

No es inimaginable que una expedición cruce en un futuro el abismo interestelar. Viajando a un décimo de la velocidad de la luz (algo teóricamente factible), podría llegar a la estrella más cercana en cuarenta años. Hoy día algo así está fuera de nuestro alcance, por lo que el primer paso ha de ser la colonización del sistema solar, a fin de consolidar en una primera etapa las tecnologías necesarias para una posible expansión por la galaxia.

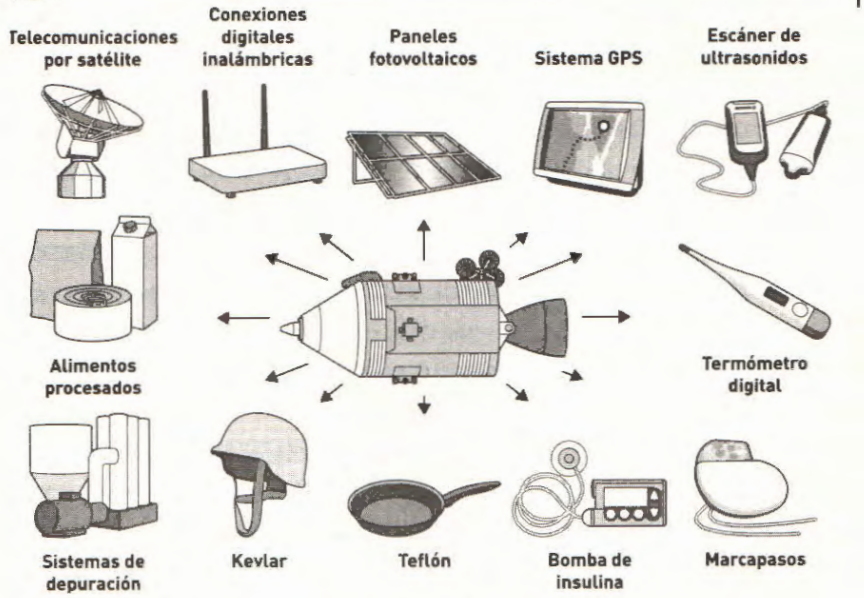
La colonización del sistema solar producirá cambios drásticos en la *geopolítica* (el mismo término geopolítica ya no sería estrictamente aplicable), ya que sería más que probable la aparición de nuevos estados en los nuevos mundos colonizados. Si además se encontrara vida en otros planetas, este hecho tendría profundas repercusiones: la aparición de la vida en más de un mundo en un mismo sistema planetario implicaría que su surgimiento debería ser más fácil de lo que hoy se cree, y por tanto debería abundar en el universo. Si esto fuera así, las probabilidades de que hubiera otras formas de vida inteligente en el universo serían muy altas, lo que forzaría la revisión de la manera como la humanidad se considera a sí misma.

Los beneficios del espacio en la Tierra

La exploración espacial ha sido la actividad que más ha contribuido al desarrollo tecnológico. En general, cualquier esfuerzo de investigación científica tiene como consecuencia una serie de avances que repercuten en la sociedad. La popularización de, por ejemplo, las cámaras digitales compactas lo debe todo a las necesidades de la astronomía, que en la década de 1980 comenzó a aplicar esta tecnología para obtener datos de los objetos celestes ya digitalizados y listos para ser tratados por un ordenador, sustituyendo así la tradicional fotografía sobre emulsión química. De forma similar, la necesidad de la física de partículas de localizar con precisión la posición de las partículas subatómicas cargadas llevó al desarrollo de detectores ultraprecisos de campos eléctricos, cuya tecnología fue de inestimable ayuda para el desarrollo de las pantallas táctiles de móviles y tabletas. En comparación, los desafíos que afrontó la exploración espacial fueron de una envergadura extrema y se tuvieron que resolver en un período de tiempo extremadamente breve. Estas condiciones al límite hicieron que se convirtiera en un revulsivo tecnológico sin precedentes.

Como resultado, se crearon muchas tecnologías innovadoras o se desarrollaron hasta su máxima expresión otras que antes habían tenido un uso minoritario. Ejemplos de esta transferencia de tecnología fruto de la investigación espacial (fig. 1) son materiales como los policarbonatos que se usan en los cascos de motorista, los pañales y compresas de gelatina absorbente, el kevlar de los chalecos antibala, el maylar de los guantes de seguridad o el teflón, usado como tejido principal de los primeros trajes espaciales por sus propiedades ignífugas y aún usado en la cubierta de los actuales. Otros logros que nacieron en la carrera espacial fueron los alimentos deshidratados, los paneles solares (que siguen siendo la principal fuente de energía de los ingenios espaciales), los detectores de humo (utilizados por primera vez en el *Skylab*), los destornilladores a ba-

Fig. 1



Diferentes productos tecnológicos desarrollados para los viajes espaciales y sus aplicaciones posteriores en la Tierra.

tería y otras herramientas inalámbricas, las pilas de combustible y los códigos de barras (usados para identificar los miles de piezas que hay que crear y ensamblar para construir hasta la más sencilla nave espacial). Asimismo, los límites en la capacidad de carga y en la disponibilidad de energía en cualquier dispositivo astronáutico llevaron al diseño de ordenadores más ligeros, con menores consumos, mayores capacidades y mayor fiabilidad.

El propio espacio proporciona unas condiciones de investigación que son imposibles de encontrar en la Tierra, en especial la microgravedad, que permite la síntesis de nuevos materiales, como esferas absolutamente perfectas o cristales de silicio con una uniformidad que no se puede obtener en presencia de un campo gravitatorio intenso. El estudio del organismo humano bajo tales condiciones también incrementa nuestra comprensión sobre su funcionamiento y permite explorar posibles nuevas terapias. Asimismo, para controlar la salud de los astronautas y dado el reducido espacio de los habitáculos espaciales, se han desarrollado monitores de salud y test clínicos ultracompactos, que luego han comenzado a utilizarse en hospitales.

Es de esperar que la colonización del espacio suponga un estímulo tecnológico aún mayor. Los desafíos que se deberán superar para establecer colonias permanentes en otros mundos y en el espacio y el desarrollo tecnológico que generen tendrán repercusiones en la sociedad que irán más allá de lo que hoy se pueda prever. Como muestra de los caminos inesperados que toman los avances tecnológicos puede presentarse el caso de la web mundial: nacida inicialmente como un medio de comunicación y coordinación entre los físicos de partículas de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), ha cambiado en poco tiempo nuestra vida y hoy es parte fundamental del quehacer diario de particulares, empresas e instituciones. Tecnologías emergentes, como la nanotecnología, los nuevos materiales y la inteligencia artificial se beneficiarán de las exigentes necesidades de los viajes espaciales.

PRIMEROS PELDAÑOS EN LA CONQUISTA DEL ESPACIO

A lo largo de la historia de la exploración espacial ha habido varios hitos relevantes para una futura colonización. El principal fue el programa *Apollo* y la llegada del ser humano a la Luna en 1969, una hazaña que estimuló la imaginación y el espíritu de aventura de toda una generación. Las misiones *Apollo* proporcionaron una inmensa cantidad de datos sobre nuestro satélite, como su composición, sismicidad o las interacciones con la radiación solar, así como casi 400 kg de muestras lunares. Sus éxitos espolearon la investigación espacial y en la década siguiente la exploración del espacio se volcó en los demás planetas del sistema solar. Así, en 1973 la *Pioneer 10* consiguió atravesar por primera vez el cinturón de asteroides y llegar a Júpiter, el más cercano de los planetas gigantes. Un año después llegaba su gemela, la *Pioneer 11*, que protagonizó la primera visita a Saturno. En 1976, las sondas *Viking* se posaron en Marte, analizando la composición química del aire y del suelo. Las sondas *Voyager 1* y *2*, lanzadas en 1977, ampliaron la exploración de estos dos planetas, visitando además por vez primera Urano y Neptuno. En la misma época se establecieron nuevas agencias espaciales en otros países y en 1975 varios estados europeos unieron sus intereses para fundar la Agencia Espacial Europea (ESA). El avance del conocimiento de los planetas del sistema solar en este período resultó espectacular.

Los límites de los vuelos tripulados

Colonizar el espacio implicará seres humanos embarcados en largos viajes. Pese a que las cápsulas *Apollo* hayan sido los vehículos que más lejos han llevado a un grupo de astronautas, en lo referente a los vuelos tripulados la punta de lanza tecnológica ha sido sin duda el transbordador espacial. Su precedente fue el *X-20 Dy-*

na-Soar del ejército del aire de Estados Unidos, una nave que se diseñó para que despegara como un cohete pero que debía aterrizar pilotada como un avión, permitiendo su reutilización. En 1958 este proyecto fue cancelado, pasando el liderazgo de los vuelos espaciales a la recién fundada NASA. Bajo la nueva dirección, la prioridad se centró en cohetes desechables lanzados en trayectoria balística, de los que solo se recuperaba la cápsula ocupada por los astronautas. Este tipo de misiones resultaban muy costosas, ya que la mayor parte de la inversión se dedicaba al motor del lanzador, que se perdía en cada lanzamiento. Por ello, una vez concluida la carrera espacial entre estadounidenses y soviéticos con el primer alunizaje, la NASA decidió resucitar el viejo proyecto del X-20 Dyna-Soar, convertido en el de los transbordadores espaciales (fig. 2), que funcionaría entre 1981 y 2011. La antigüedad de la flota de transbordadores y el elevado coste de su mantenimiento fueron factores que contribuyeron a su liquidación. Con todo, estas naves han sido las más sofisticadas y uno de los mayores bancos de pruebas sobre qué características debería poseer una nave espacial tripulada que nos llevara a otros planetas.

Acampadas en el patio de casa

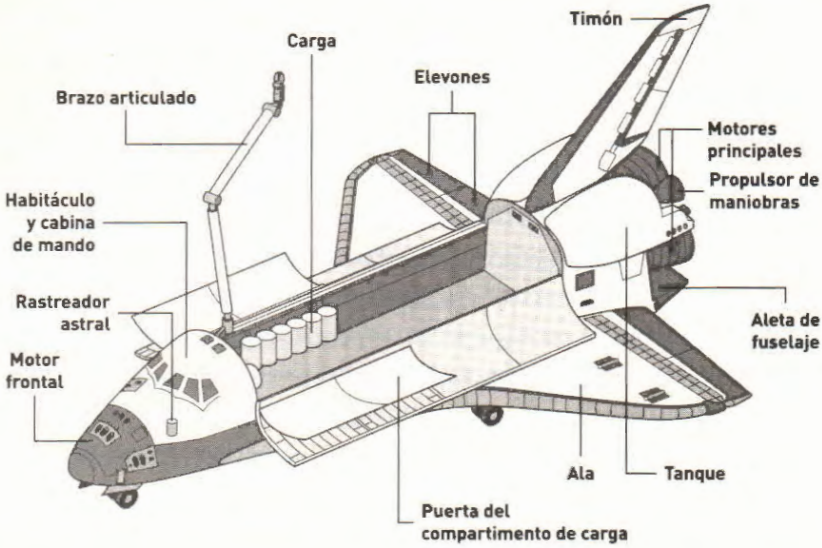
Las condiciones necesarias para viajar por el espacio crecen en dificultad cuando no se plantea realizar misiones de corta duración, sino mantener durante períodos prolongados seres humanos fuera de las condiciones terrestres. Hasta la fecha, las estaciones espaciales, mantenidas en órbita alrededor de nuestro planeta, han sido lo más parecido a colonizar el espacio. A una escala reducida, afrontan muchos de los retos y peligros de la verdadera colonización espacial: mantener aire respirable, proteger a los astronautas de los riesgos del espacio, suministrar agua y alimentos, reciclar los desechos, etc. Ha habido siete estaciones espaciales que merez-

> DOS GENIOS DE LA ASTRONÁUTICA

Wernher von Braun, un científico de origen alemán, fue el cerebro tras el programa estadounidense durante la carrera espacial. A pesar del brillante trabajo de Von Braun, los éxitos iniciales de la carrera espacial se inclinaron hacia el lado soviético. Esto se debió en exclusiva a Serguéi Koroliov, director del programa espacial soviético, un genio cuya identidad fue mantenida en secreto hasta su muerte. Al éxito del *Sputnik I* le siguieron el viaje de la perra *Laika* (primer ser vivo en el espacio), de Yuri Gagarin (primer cosmonauta), de Alexei Leonov (primer paseo espacial) y de Valentina Tereshkova (primera mujer en el espacio). Solo tras la muerte de Koroliov en 1966 la NASA pudo tomar ventaja en la carrera espacial. Kennedy, que deseaba un logro que capturara la imaginación de los estadounidenses, estableció como meta principal la llegada hasta la Luna, posible gracias al *Saturno V*, un cohete diseñado por Von Braun.

— Los ingenierios astronáuticos Wernher von Braun (izquierda) y Serguéi Koroliov (derecha), artífices de la carrera espacial entre Estados Unidos y la Unión Soviética.

Fig. 2



Esquema de un transbordador espacial de la NASA y de sus sistemas principales.

can esa denominación, permaneciendo más de un año en órbita: el *Skylab* de la NASA (1973-1979), las estaciones soviéticas *Salyut 4* a 7 (1972-1991 en conjunto) y *Mir* (1986-2001), la china *Tiangong 1* (en órbita desde septiembre de 2011) y la Estación Espacial Internacional (ISS), la mayor y la que ostenta el récord de tiempo de permanencia en el espacio (desde 1998, con un final previsto no antes de 2024). Desde su inicio, la ISS fue concebida como un proyecto internacional en el que colaboraron las agencias de Estados Unidos, Canadá, Europa, Japón y Rusia. Un cohete ruso puso en órbita su primer módulo, al que se han ido añadiendo nuevos componentes de distinto origen. La Estación Espacial Internacional es un logro de la colaboración científica internacional, un laboratorio privilegiado donde llevar a cabo investigaciones imposibles de realizar en la superficie de la Tierra y un lugar donde la tecnología se sigue

llevando al límite, apuntalando nuevos desarrollos que resultarán imprescindibles para futuras misiones tripuladas, como el estudio de la biología humana en ingravidez prolongada, el de la eficacia de los blindajes contra radiación e impactos o el análisis de los efectos psicológicos del aislamiento prolongado en un entorno completamente artificial.

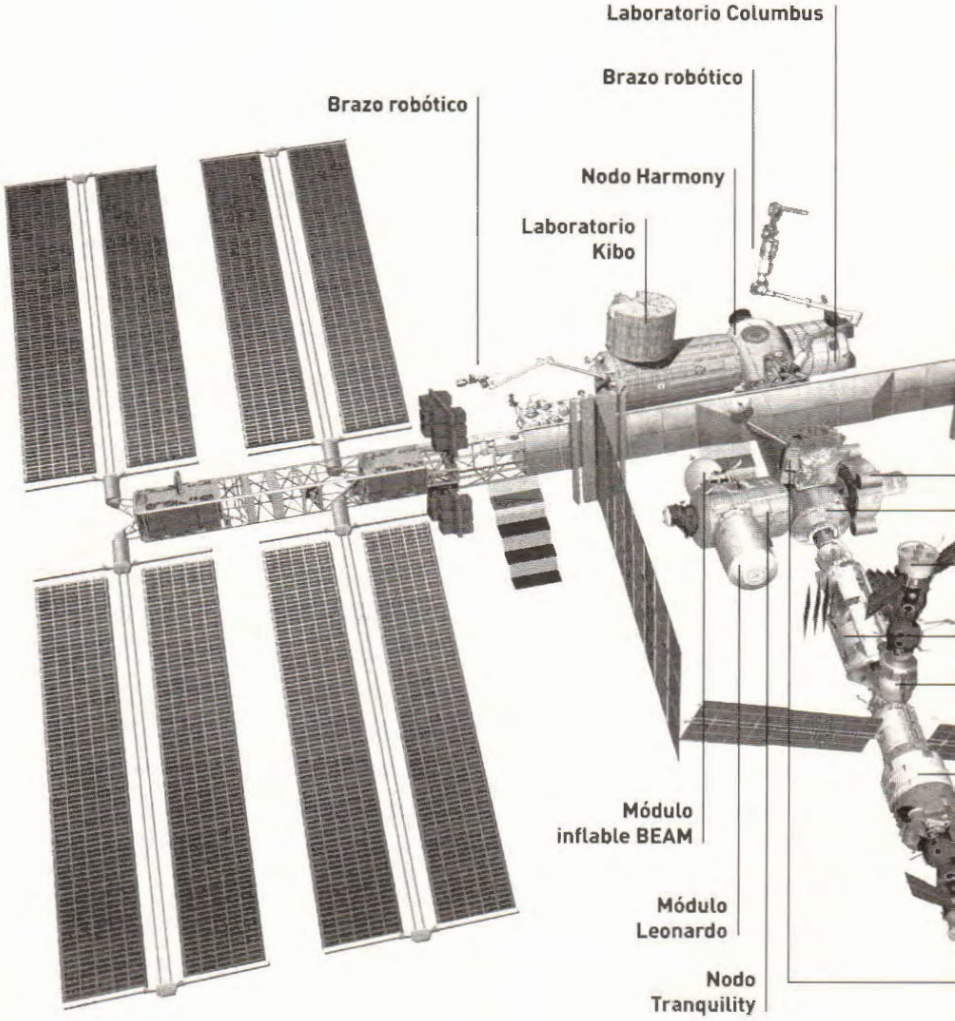
Explorar el vecindario

Más de 290 sondas científicas de diferentes agencias espaciales han tenido como principal misión la obtención de datos de los planetas y satélites del sistema solar. De ellas, 180 culminaron su objetivo con éxito completo, un balance que da idea del grado de dificultad de estos proyectos. Estas misiones, además de permitirnos conocer muchísimo mejor nuestro inmediato «vecindario», también han servido para poner a prueba y consolidar tecnologías necesarias para viajes de largo alcance. Los sistemas de calidad y riesgos experimentaron una progresiva mejora, que hace muchísimo más fiables las sondas espaciales más modernas, comparadas con los dispositivos pioneros: durante las décadas de 1950 y 1960, el porcentaje de misiones exitosas se mantenía cerca del 33%, es decir, más de dos tercios de las misiones fracasaban por diferentes factores; conforme la tecnología mejoró, el porcentaje de éxito creció hasta llegar al 90%.

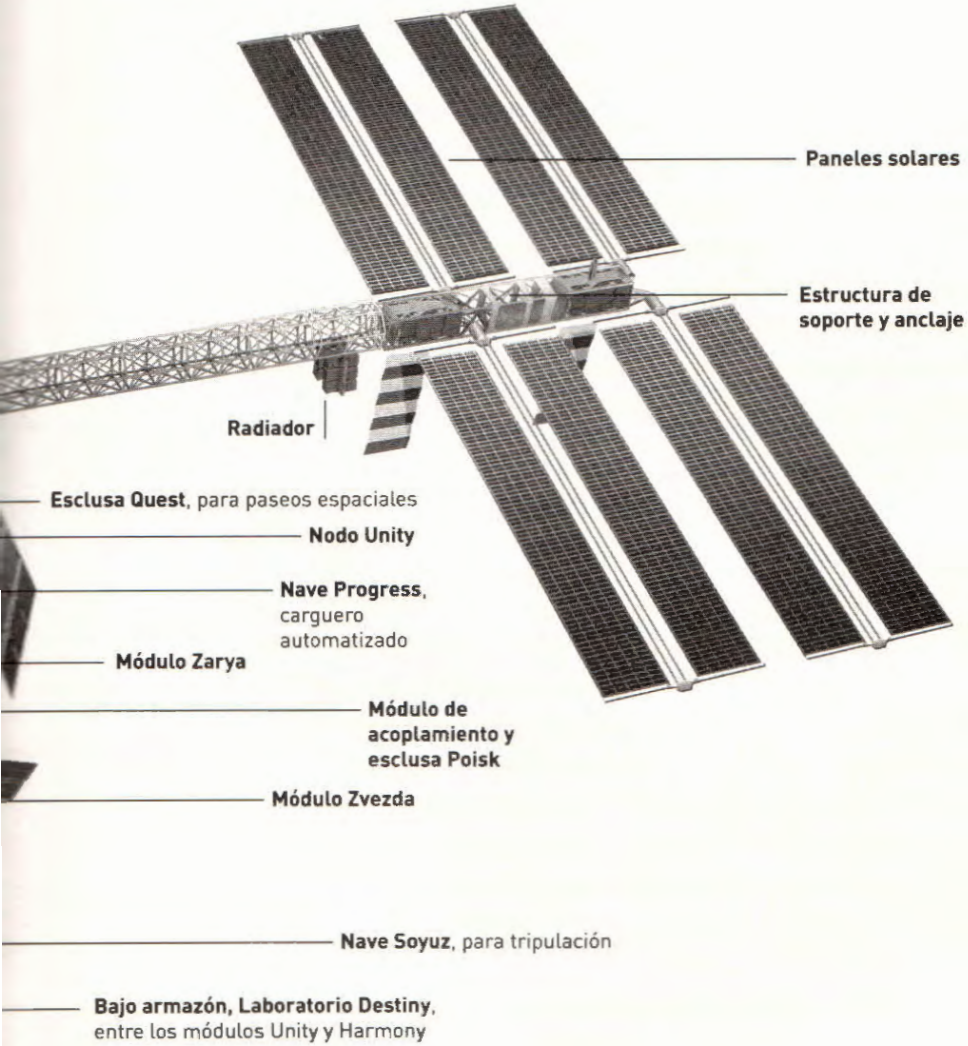
Las sondas más recientes son mucho más fiables y mucho más complejas, y se diseñan para afrontar misiones más difíciles y ambiciosas. Disponen de sistemas autónomos de toma de decisiones que les permiten funcionar en algunas circunstancias sin depender de las instrucciones recibidas desde el control de misión en la Tierra. Hay que tener en cuenta que a las distancias a las que viajan, los mensajes que se les envían, así como sus respuestas, pueden demorar muchos minutos, incluso horas, por lo que en situaciones im-

> LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

Construida con elementos ensamblados en órbita, la Estación Espacial Internacional ha crecido a partir de un armazón en el que se fijaron los grandes paneles solares que le suministran la mayor parte de la energía.



En el centro, una serie de nodos enlazan los módulos con propósitos generales (habitáculos, servicios, almacenaje, etc.) con los laboratorios destinados a diversos ensayos científicos.



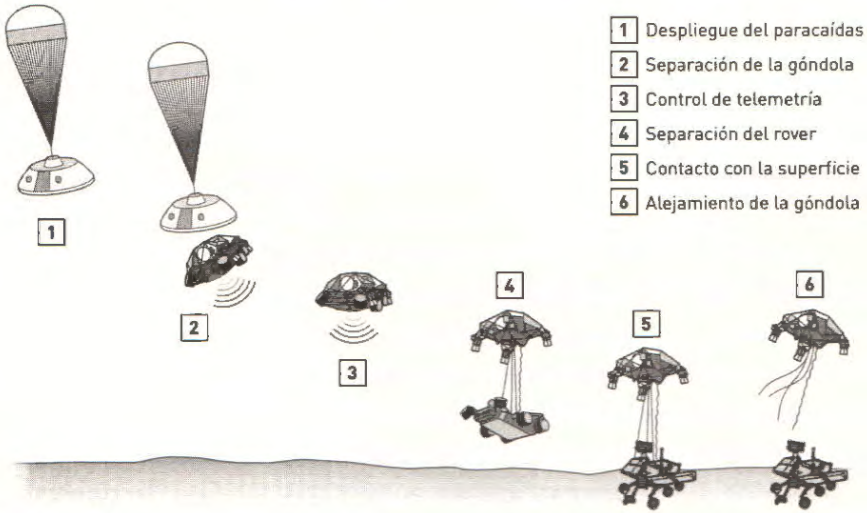
previstas en naves muy alejadas no hay tiempo para una reacción eficaz comandada desde la Tierra. Esta tendencia a la autonomía funcional tiene como objetivo dotar a los diferentes dispositivos de verdaderos sistemas de inteligencia artificial. Los rovers *Spirit* y *Opportunity*, dos vehículos de exploración, que aterrizaron en Marte en 2004, fueron equipados con un sistema autónomo de navegación para permitirles recorrer pequeñas distancias en terrenos relativamente complejos, aunque requiriendo del guiado y de las correcciones diarias de los operadores humanos desde nuestro planeta. En comparación, el más reciente rover *Curiosity*, enviado en 2011, dispone de un sistema de inteligencia artificial que le permite trazar un mapa tridimensional de sus alrededores, considerar todos los caminos posibles y elegir por sí mismo la mejor alternativa: los operadores solo necesitan indicar el lugar de destino y, si el camino es factible, llegará allí por sí mismo. *Curiosity* se diseñó para ser actualizable, una posibilidad que se puso en práctica en 2016, cuando recibió un paquete de *software* de inteligencia artificial gracias al cual pudo empezar a elegir las muestras de terreno a examinar a partir de su propio análisis del entorno.

El descenso sobre la superficie planetaria es una de las maniobras más difíciles y con mayor porcentaje de fallos. En 2005 la sonda europea *Huygens* se posó con éxito sobre Titán, un satélite de Saturno de tamaño comparable al de Marte. Pero sin duda uno de los grandes hitos en cuanto a aterrizajes en el sistema solar tuvo lugar en 2014, cuando la nave europea *Rosetta* dejó caer sobre la superficie del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, la pequeña sonda *Philae*. Pese al éxito parcial de la maniobra, se considera una hazaña sin precedentes dadas las especiales condiciones del objetivo, de las que no se tenía un conocimiento completo.

La tecnología de los cohetes lanzadores también se ha consolidado, en buena parte gracias a que las agencias espaciales consiguieron hacer del espacio un negocio rentable con la puesta en órbita de satélites de todo tipo. El espacio cercano a la Tierra es el

> CÓMO POSARSE CON ÉXITO SOBRE MARTE

Desde el inicio de la exploración planetaria, solo la NASA ha conseguido posar en la superficie de Marte sus dispositivos de exploración. La experiencia de las misiones fallidas de Rusia, la ESA y la misma NASA enseñó que para aterrizar con éxito en Marte, la principal dificultad era reducir la altísima velocidad de las sondas a su llegada al planeta. En una primera etapa, se usó el frenado atmosférico, una maniobra en la que se aprovechaba la resistencia de la atmósfera marciana. Cuando la altura era de pocos kilómetros, entraba en funcionamiento el sistema de aterrizaje del último tramo: las dos sondas *Viking* y *Phoenix* usaron retrocohetes propios, mientras que los rovers *Sojourner*, *Spirit* y *Opportunity* estaban instalados en góndolas de las que colgaban las sondas, que se dejaban caer protegidas por un conjunto envolvente de airbags. Por último, el rover *Curiosity* utilizó una técnica aún más sofisticada: la góndola con retrocohetes contaba con una grúa para el descenso controlado del vehículo hasta el suelo.



— Etapas del sistema de posado del rover *Curiosity* sobre la superficie de Marte.

territorio de los satélites de telecomunicaciones y de la constelación de satélites de los sistemas de localización GPS, GLONASS y Galileo. La observación de la propia Tierra también se ha beneficiado del uso del espacio: satélites meteorológicos, militares y de muchas otras especialidades de observación remota forman parte de proyectos que producen beneficios y cuyas inversiones constituyen el principal volumen de negocio de las agencias espaciales. A su sombra han surgido diversas empresas privadas que se han especializado en el lanzamiento de satélites. Como consecuencia, los cohetes tradicionales se han convertido también en una tecnología muy fiable.

Desde un punto de vista tecnológico, los nuevos avances en astronáutica van a permitir logros impensables pocos años atrás. Es muy posible que en un futuro cercano se cuente con medios para hacer viajes a otros planetas de nuestro sistema con tiempos de tránsito asumibles. Los motores iónicos, que tienen la virtud de proporcionar aceleración de forma continuada con un consumo reducido, facilitarían alcanzar altas velocidades y serían una alternativa eficaz a los cohetes químicos para la navegación interplanetaria. Los veleros solares, que permitirán navegar por el vacío de una forma muy similar a como lo hacen los barcos veleros, impulsados por la fuerza del flujo conocido como *viento solar*, es una tecnología que obtiene resultados muy esperanzadores en las pruebas experimentales.

LOS RETOS PENDIENTES

Uno de los principales retos que tiene la exploración espacial es atraer el interés del público. El gran impacto mediático conseguido por la carrera espacial se perdió con la disminución de las misiones tripuladas. Las sondas robóticas, aunque fascinantes desde el punto de vista científico, no captan la atención del público de la misma

manera. Esta situación podría cambiar en un breve plazo, con la incorporación de nuevos actores a la exploración espacial.

La nueva carrera hacia la Luna

China parece interesada en comenzar una nueva carrera espacial. Los planes del gigante asiático son sin duda muy ambiciosos: en 2011 puso en órbita su primera estación espacial, la *Tiangong 1*, a la que siguió en 2016 la *Tiangong 2*, que, a parte de sus funciones como laboratorios espaciales, sirven como campo de pruebas para el diseño de una futura estación modular de gran tamaño, que podría ser ensamblada en órbita a partir de 2023. Pero sin duda lo más estimulante es el programa *Chang'e* (nombre de la diosa china de la Luna), que desde 2007 viene situando varias sondas en órbita alrededor de la Luna; en 2013 depositó con éxito el rover *Yutu* sobre nuestro satélite, y se espera que en 2018 traiga a la Tierra muestras de rocas lunares. La culminación de este programa sería el envío de un astronauta chino a la Luna entre 2025 y 2030. A largo plazo, si los resultados de las misiones anteriores fueran satisfactorios, se ha anunciado la intención de instalar una base lunar habitable.

El resto de agencias espaciales no verán estas hazañas con indiferencia y todo parece indicar que Estados Unidos aceptará el desafío, pues está preparando una serie de cohetes lanzadores, agrupados en el proyecto Space Launch System (SLS), que, además de sustituir a los retirados transbordadores espaciales, tendrán potencia suficiente para enviar misiones tripuladas a la Luna o incluso a Marte, siendo estos últimos similares en tamaño y prestaciones a los *Saturno V* de Von Braun.

Rusia tampoco pretende quedarse atrás y ha anunciado un ambicioso plan para establecer una colonia robótica permanente en la Luna, la *Lunny Poligon*, que se completaría en 2037. Sin presencia humana, la estación se comportaría en cierta forma como

un telescopio espacial o una sonda robótica, pero con un tamaño mucho mayor y establecida sobre la superficie lunar. La estrecha colaboración entre las agencias rusa y estadounidense, estimulada por el uso de las naves rusas *Soyuz* como sustitutas de los transbordadores estadounidenses en el abastecimiento y acceso a la Estación Espacial Internacional, podría llevar a la participación de la NASA en los planes lunares de Rusia.

Por último, la agencia espacial japonesa JAXA se unió a la competición lunar con el programa SELENE (conocido en japonés como *Kaguya*). En 2007, esta agencia ya puso en órbita lunar una misión no tripulada en torno a la Luna, y que prevé el aterrizaje de la pequeña sonda robótica *SLIM* y de una misión para la recogida automática de muestras lunares en un corto plazo. En principio, la exploración lunar japonesa se limitará al envío de dispositivos robóticos, aunque en algunos foros se ha apuntado a la intención de establecer también una base lunar habitable a partir de 2030, si bien se trata de un plan a confirmar, que bien puede ser sustituido por una colaboración internacional al estilo de la Estación Espacial Internacional.

En cualquier caso, la Luna es el lugar idóneo para establecer una base científica permanente donde enfrentarse a los retos de la colonización. Todo aquello que sea necesario para establecer una colonia en Marte, Mercurio o las lunas de los planetas gigantes, también será necesario en la Luna. Y como está comparativamente muy cerca (a efectos prácticos es nuestro patio trasero), el envío de materiales se facilita, e incluso está lo bastante cerca como para plantearse una misión de rescate en caso de ser necesario. Es lógico que nuestro primer paso sea la Luna.

Logística para salir al espacio

Los costes de situar cualquier estación o satélite más allá de las órbitas de baja altitud (*low earth orbit* o LEO) supone un inmenso gasto

energético y económico. La cantidad de materiales que es necesario enviar al espacio para una estancia prolongada de seres humanos, ya sea en estación espacial o en colonia planetaria, es inmensa: pesados blindajes contra radiación, agua, alimentos, materiales de construcción... Hay que recordar que la Estación Espacial Internacional es el objeto más caro creado por el ser humano, con un coste que se estima superior a los cien mil millones de euros, de los cuales la mayor parte corresponde solo a los costes de los lanzamientos desde la Tierra. Lograr reducir la inversión necesaria para el envío de los materiales al espacio se vuelve así imprescindible para la empresa de la colonización del sistema solar.

> Nuestros dos principales problemas son la gravedad y el papeleo. Podemos derrotar a la gravedad, pero a veces el papeleo es abrumador.
>
> WERNHER VON BRAUN

Como cualquier otra tecnología, la seguridad en los vuelos espaciales nunca va a llegar al 100 %, y aunque solo el 2 % de los vuelos tripulados han causado víctimas fatales, sigue siendo uno de los principales retos. Las misiones robóticas son cada vez más seguras, producto de la experiencia de décadas de proyectos con fracasos de los que aprender. Pero la seguridad de los astronautas durante los vuelos espaciales requiere mucho más que la ausencia de fallos en la electrónica o que la nave llegue al punto previsto, y en eso la experiencia acumulada es mucho menor: salvo las misiones *Apollo*, la mayor parte de los vuelos tripulados han sido de corto recorrido, de la Tierra hasta una órbita LEO, no los largos vuelos que requerirá la colonización espacial. La mayor parte de los decesos se produjeron durante el aterrizaje o el despegue, pero también es cierto que cuanto más largo es un viaje, mayores son las probabilidades de que se produzca un fallo fatal. En el mundo de la aeronáutica es normal probar un nuevo avión miles de veces para asegurarse de que todo va bien y corregir cualquier fallo antes de considerarlo

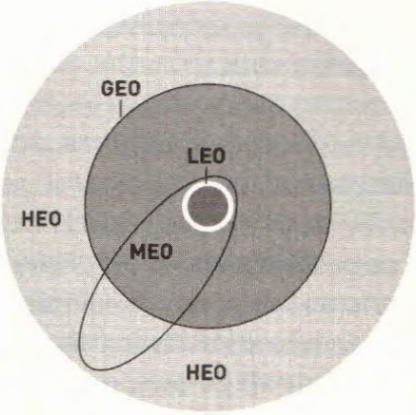
operacional, pero esto no es posible en astronáutica. Esto conlleva que la manera más eficaz de incrementar la seguridad es hacer los sistemas lo más simples posibles, considerando que deben lograr sus objetivos. Tal es el caso de las naves *Soyuz* rusas, que en las últimas cuatro décadas de servicio apenas han tenido un accidente.

La seguridad informática también se está convirtiendo en una posible fuente de problemas. La dependencia de los ordenadores cada vez es mayor, y un fallo informático, un cuelgue de los ordenadores, un virus o un ciberataque pueden llegar a inutilizar una nave o sus sistemas de soporte vital. Además, la tecnología informática que se usa en el espacio (como los ordenadores de la Estación Espacial Internacional) no se renueva con frecuencia y suele quedar obsoleta. Hackear una nave espacial o satélite es sin duda ya un desafío para muchos activistas. La defensa más obvia es aislar la nave, pero si hay algo que resulta imprescindible para una nave en el espacio es la comunicación con la Tierra. La defensa frente a estos ataques es tan crítica que la ciberseguridad de la NASA se dedica, entre otras cosas, a intentar hackear los sistemas de sus naves y satélites, para descubrir los fallos e intentar corregirlos antes de que los aprovechen agentes externos.

La salud de los astronautas también es otro de los grandes retos. El espacio es un lugar hostil a la vida humana, que se agrava si se considera la imposibilidad de tratar a bordo de una nave algunas dolencias que en la Tierra no revestirían gravedad. La radiación ambiental es alta pese a los blindajes y los efectos de la ingravidez afectan negativamente a la salud. Además, en las estaciones espaciales, debido entre otras cosas a la imposibilidad de ventilarlas, tienden a acumularse microorganismos que pueden resultar nocivos: en la estación soviética *Mir* se llegaron a contabilizar 234 especies microbianas a bordo, con potencial patógeno. Por ello, los astronautas deben seguir estrictas medidas de seguridad y explorar el habitáculo para rastrear cualquier fuente de contaminación biológica. La salud mental también es una fuente de preocupación, ya

> ¿DÓNDE SITÚO MI SATÉLITE?

Las órbitas alrededor de la Tierra reciben diferentes denominaciones. Las de baja altitud (*low earth orbit* o LEO), correspondientes a una franja de altitudes entre 160 a 2 000 km sobre la superficie de la Tierra, con períodos orbitales de entre 1,5 y 2 horas, son las más utilizadas porque es necesario un menor gasto de energía para situar un satélite en ellas. La mayoría de los satélites y, en consecuencia, de basura espacial se concentra en esta región, donde se han situado las estaciones espaciales. Los satélites aún encuentran aquí una tenue atmósfera, que provoca un frenando que se debe compensar de continuo. Entre 2 000 y 36 000 km se hallan las órbitas MEO (*medium earth orbits*), con períodos orbitales entre 2 y poco menos de 24 horas. En esta región se encuentran los satélites del sistema GPS, a 20 350 km de altitud, con período orbital de 12 horas. La órbita geoestacionaria (GEO) se encuentra a 36 000 km: aquí el período orbital es exactamente un día, de manera que un satélite en esta región gira al mismo ritmo que la Tierra, fijo siempre sobre un mismo punto de su superficie. Buena parte de los satélites de telecomunicaciones y meteorológicos siguen una órbita geoestacionaria. Por encima de las GEO comienzan las órbitas HEO (*high earth orbits*), con un período orbital mayor que un día. Comparten siglas con otro tipo de órbitas, las *high elliptical orbits*, un tipo de órbita muy elíptica que atraviesa diferentes regiones. En las regiones más altas se encuentran pocos satélites, la mayoría con fines científicos.



— Distribución de los diferentes tipos de órbitas alrededor de la Tierra. La elección de una u otra depende del uso previsto del satélite, pero también de otros factores, como el coste del combustible necesario para alcanzarlas.

que no es en absoluto fácil convivir en un ambiente reducido con un elevado nivel de estrés, físicamente separado del ambiente familiar durante largos períodos de tiempo y rodeado por el entorno más hostil que se conoce, donde cualquier fallo puede implicar una situación crítica.

Lo que falta por lograr

Los retos anteriores están siendo enfrentados, pero a largo plazo, para tener una red de colonias funcionales en nuestro sistema solar, serán varios los logros a alcanzar. Sin duda, el principal será conseguir viajes rápidos y baratos. Unos transportes eficaces que faciliten el envío de mercancías, medicamentos y pasajeros en tiempos razonables ayudará a solventar muchos de los problemas que pueden surgir durante la colonización.

Además, mientras el tráfico de materiales entre los diferentes enclaves no sea algo fácil y económico de realizar, conseguir las materias primas para la supervivencia se convertirá en el principal problema. Desde la Tierra se podrán enviar algunas cosas, principalmente manufacturas delicadas, aunque a costes (nunca mejor dicho) astronómicos. Pero las materias primas como metales, materiales de construcción, agua, oxígeno o incluso compuestos orgánicos sencillos pueden salir del propio entorno de la colonia, si esta se halla sobre un planeta o satélite, o bien obtenerse de los asteroides, como fuente alternativa.

Incluso contando con un abastecimiento regular de materias primas, será imprescindible reciclar agua y aire, y obtener nutrientes a partir de alguna forma de agricultura o de ganadería. Por tanto, tener ecosistemas cerrados funcionales y autosostenibles será una prioridad para el mantenimiento a largo plazo de las colonias.

Aunque es una componente fundamental, la energía parece que será la menor de las preocupaciones, al menos en las regiones más

cercanas al Sol. Los paneles fotovoltaicos son una fuente útil y fiable de energía eléctrica, que ya abastecen a la Estación Espacial Internacional. No se puede descartar el aporte energético que puede proporcionar la fusión nuclear, cuando llegue a desarrollarse.

Si todos estos problemas encuentran solución, el sistema solar será accesible para la humanidad. El éxito en esta escala permitiría a muy largo plazo enfrentar retos más ambiciosos, reservados hoy al ámbito de la ciencia ficción, como la terraformación de algunos mundos para hacerlos similares a la Tierra o incluso la modificación (genética o cibernética) de los propios seres humanos para que se adapten mejor a estos entornos hostiles. La mayor aventura de la ciencia ha dado sus primeros pasos y la humanidad se ha asomado a un universo tan infinito en extensión como en posibilidades. Cada etapa que se culmine facilitará las siguientes, en un camino que puede no tener límites.

02 CÓMO SALIR DE LA TIERRA

Moverse en el espacio interplanetario es una tarea muy distinta a la de hacerlo en la Tierra. Para desplazarse con éxito en estas condiciones, hay que resolver dos cuestiones: cómo conseguir el impulso necesario y qué camino es el mejor para llegar al punto de destino. En ambos casos, la física ha proporcionado soluciones ya comprobadas.

Desde que Robert Goddard lanzó en 1926 el primer cohete moderno de combustible líquido, estas naves han llevado al espacio a más de medio millar de astronautas, puesto en órbita varios miles de satélites y enviado más allá de la Luna, en todas direcciones, sondas no tripuladas para la exploración del sistema solar, y con toda probabilidad impulsarán la primera misión tripulada a Marte. La ciencia del viaje espacial es una de las cabezas de puente de la innovación científica, y sin embargo sus principios de funcionamiento apenas han cambiado desde que los chinos inventaron los cohetes pirotécnicos en el siglo XIII. La física del vuelo espacial es relativamente sencilla: la meta de la ingeniería de cohetes es conseguir que una explosión controlada, a altísimas temperaturas, supere todos los riesgos y se convierta en el motor para salir al espacio. Pero ¿es el único modo de lograrlo? ¿Hacia dónde se encaminan las investigaciones más avanzadas? ¿Cuál será el sistema de propulsión que llevará a la humanidad a otros planetas? Responder a estas preguntas es clave, pues para colonizar el sistema solar es imprescindible disponer de medios de transporte interplanetario eficaces.

¿CÓMO FUNCIONAN LOS COHETES?

La física de los cohetes es relativamente sencilla: se basan en el principio de acción y reacción establecido por Newton, que afirma que, a la acción de cada fuerza ejercida por un cuerpo sobre otro, le corresponde una reacción de igual intensidad y dirección, pero de sentido contrario. Por ello, si alguien lanza un objeto para alejarlo de sí, recibe ese mismo impulso revertido. Los cazadores conocen bien este fenómeno con el nombre de *retroceso*, ya que cada vez que disparan un arma de fuego, han de dominar la fuerza que la desplaza en sentido contrario e impulsa la culata contra el hombro. Este empuje se genera en cuanto la bala es disparada por el arma, y lo que pase con el proyectil una vez sale del cañón es irrelevante en cuanto a la fuerza de reacción se refiere. Este es el mismo principio que rige el funcionamiento de un cohete: son las moléculas de los gases de combustión que salen despedidas por la tobera a altísimas velocidades las que proporcionan el empuje que hace posible el vuelo.

Además del empuje de la fuerza de reacción, que impulsa la nave hacia arriba durante el despegue, para comprender qué hace posible que un cohete navegue por el vacío hay que tener en cuenta otras dos magnitudes físicas: el impulso específico y el delta-v. Pese a sus nombres poco familiares para el gran público, son en realidad magnitudes fáciles de entender.

El impulso específico es la velocidad (v_e) a la cual salen eyectados los gases por la tobera del cohete, dividida entre la aceleración de la gravedad (g) en la superficie terrestre, que en el Sistema Internacional de unidades vale 9,81 m/s^2. Al dividirse una aceleración entre una velocidad, el impulso específico se puede dar tanto en metros por segundo como en segundos, de manera que también se puede definir como el tiempo durante el cual 1 kg de propelente es capaz de mantener un empuje continuado de 1 kg de fuerza.

La magnitud conocida como *delta-v* es la aceleración que alcanza la nave debida a la fuerza de empuje, es decir, el cambio de

velocidad que sufre el vehículo desde que se inicia una maniobra hasta que esta termina. Visto de otro modo, es la cantidad en la que se debe incrementar (o disminuir) la velocidad de una nave para, por ejemplo, pasar de su órbita actual a otra distinta. Aunque sencillo en apariencia, el delta-v es un concepto fundamental que indica la dificultad para llevar a cabo una maniobra dada. El primero en introducir el concepto de delta-v en astronáutica fue el físico ruso Konstantín Tsiolkovski en la ecuación del cohete que lleva su nombre:

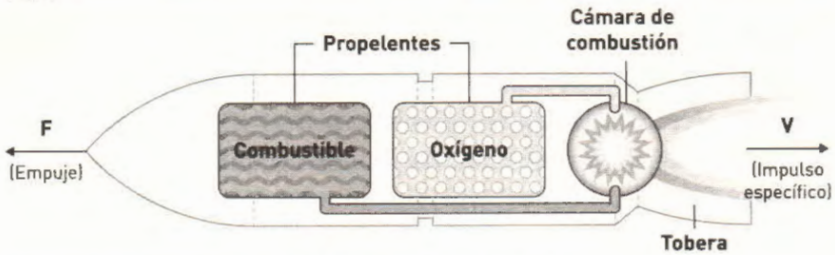
$$Delta\text{-}v = v_e \cdot ln \frac{m_i}{m_f}$$

Según esta ecuación, delta-v es proporcional al impulso específico (v_e), por el logaritmo de la masa inicial del cohete (m_i) entre su masa final (m_f). También la fuerza de empuje es proporcional al impulso específico y a la pérdida de masa. Así pues, a mayor impulso específico, mayor delta-v y empuje y menor cantidad de propelentes necesaria. En resumen, cuanta más velocidad consigan alcanzar los gases al salir por la tobera, mayor efectividad del cohete.

Los propelentes, que también reciben el nombre de propergoles, son los productos que al reaccionar generan el gas a alta presión emitido por la tobera, que proporciona el impulso al cohete. El combustible de estos dispositivos, a diferencia de la gasolina o el gasoil de un automóvil, no utiliza el oxígeno de la atmósfera, inexistente en el espacio: este elemento debe almacenarse en la nave junto con el combustible. Así, en el contexto de los cohetes espaciales, combustible y oxígeno son los propelentes del cohete (fig. 1).

El oxígeno no es el único agente oxidante (o comburente) que se puede usar. Las alternativas más frecuentes son líquidos como el tetraóxido de dinitrógeno (N_2O_4) comprimido y el peróxido de hidrógeno o agua oxigenada (H_2O_2) y sustancias sólidas como el nitrato de amonio (NH_4NO_3). De hecho, los cohetes tradicionales se suelen clasificar en según usen propelentes sólidos o líquidos. La

Fig. 1



Esquema del funcionamiento de la propulsión de un cohete.

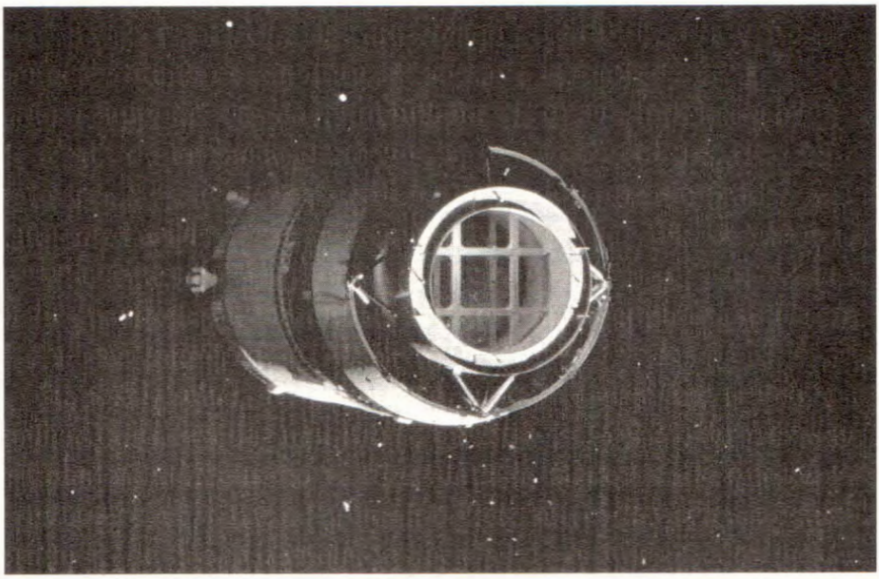
ventaja de los primeros es que los cohetes se pueden mantener sin dificultad con los depósitos llenos, y por ello son el tipo de propergol habitual para los misiles militares. Sin embargo, su combustión es difícil de regular, siendo más sencillo conseguirlo con los propergoles líquidos, que se pueden dosificar mediante válvulas. Por ello, los cohetes astronáuticos suelen estar propulsados por propelentes líquidos, que por el contrario son más difíciles de almacenar, por lo que no se cargan hasta justo antes del despegue.

Cohetes de ida y vuelta

La parte más cara de los cohetes son los motores, que se pierden en cada lanzamiento. Esto motivó el desarrollo de los transbordadores espaciales, que en realidad nunca resultaron económicos: la complejidad de sus sistemas los hacía muy vulnerables a los accidentes y necesitaban de un mantenimiento muy costoso. Calculados los balances, resultó que el precio por kilo lanzado al espacio mediante un transbordador acabó siendo mayor que el mismo parámetro para cohetes desechables. Para superar la alternativa entre costosos motores que se pierden en cada lanzamiento y naves reutilizables caras de mantener, se ha propuesto el diseño de co-

> FRAGMENTAR PARA ALIGERAR

Cuanto más ligero sea un cohete, más fácil será acelerarlo y conseguir que alcance altas velocidades. Para reducir la masa, se adoptó la estrategia de diseñar cohetes multietapa o multifase: un cohete de dos etapas se trata básicamente de dos cohetes superpuestos uno encima del otro, cada uno con sus propios motores y depósitos de propelentes. Durante el despegue solo funciona la etapa inferior, que cuando ha consumido todo su propelente es desechada y se separa de la superior. Así, el cohete pasa a convertirse en una nave más ligera, que no necesita arrastrar peso de depósitos y motores ya inútiles. Tener varias etapas permite que la etapa inferior se diseñe para trabajar dentro de la atmósfera, mientras que las siguientes se adaptan para funcionar mejor en las condiciones del vacío.



— Tercera etapa del cohete *Saturn V* de la misión *Apollo 8*, fotografiada en el espacio después de separarse de los módulos de mando y de servicio. Los puntos brillantes a su alrededor son fragmentos de las piezas de unión, destruidas durante la maniobra.

hetes lanzadores muy similares a los tradicionales, pero que sean capaces de retornar del espacio y aterrizar de manera autónoma y controlada.

> El avance revolucionario vendrá con cohetes que sean completamente reutilizables. Nunca conquistaremos Marte sin eso.
>
> ELON MUSK

La factibilidad de este nuevo enfoque ha sido defendida sobre todo por empresas privadas, y los éxitos que ya se han cosechado hacen previsible que las agencias espaciales estatales comiencen a trabajar en esta nueva línea. En noviembre de 2015 la empresa Blue Origin consiguió hacer volver su cohete *New Shepard* a su base de lanzamiento tras un vuelo por debajo de las órbitas espaciales. En abril de 2016, SpaceX logró otro éxito con un vuelo mucho más ambicioso: el cohete *Falcon 9*, mayor, más potente y con más capacidad de carga, llevó hasta la Estación Espacial Internacional tres toneladas de suministros y equipos científicos, y tras completar esta misión orbital, su primera fase aterrizó de forma controlada sobre un barco, un aterrizaje espectacular en una superficie flotante solo algo mayor que la base del propio cohete. En marzo de 2017, salió por segunda vez al espacio, puso un satélite en órbita y volvió a aterrizar de forma controlada, convirtiéndose en el primer cohete reutilizado de la historia.

MÁS ALLÁ DEL COHETE QUÍMICO

Una exploración humana del espacio requiere, además de abaratar los costes de lanzamiento, poder garantizar tiempos de vuelo cortos, lo que implica impulsos específicos elevados. Para conseguirlos, hay que tener en cuenta que, para una misma cantidad de energía liberada por la reacción química que se produce en la cámara de combustión, las moléculas expulsadas por la tobera alcanzarán mayor velocidad cuanta menos masa tengan, dado que son más fá-

ciles de acelerar: por tanto, cuanto más ligero sea el gas de escape, mayor será el impulso específico que proporcione.

La combinación en uso que proporciona mayor empuje específico es la de hidrógeno líquido como combustible y oxígeno líquido como comburente, cuya reacción produce vapor de agua, un gas muy ligero que es expulsado por la tobera. Se ha calculado que el rendimiento de este propelente está casi en el límite del empuje necesario para un vuelo tripulado a Marte, con un tiempo mínimo de año y medio, y solo de ida. Si hiciera falta ir más lejos o más rápido, o abastecer el viaje de vuelta, haría falta más propelente, lo que implicaría que el cohete pesara más, por lo que para moverlo haría falta más propelente, con un nuevo incremento de peso..., cayendo en un círculo vicioso sin salida. Se podría subsanar el problema mediante el envío automático hasta Marte de depósitos con propelente para el reabastecimiento, a un altísimo coste económico y con grandes riesgos para los astronautas, si surgiera cualquier imprevisto.

Energía nuclear en el espacio

¿No es posible usar un gas de escape mucho más ligero y, por tanto, con mayor impulso específico, como el hidrógeno o el helio? Lamentablemente, el helio es un gas inerte que casi no reacciona químicamente, y el hidrógeno es más apto como combustible que como producto final de una reacción. ¿Hay alguna forma de lograr usarlos como gases de escape? La respuesta es positiva: mediante un reactor nuclear, que calentaría estos gases a elevadísimas temperaturas, convirtiéndolos en plasma, lo que se traduciría en altísimas velocidades al escapar por la tobera. Además, un combustible nuclear, como el uranio o el plutonio, tiene una enorme densidad de energía: la fusión de una masa determinada de uranio libera cinco millones de veces más energía que la misma cantidad de hidrógeno y oxígeno. Por tanto, el peso necesario en combustible sería mucho menor, consiguién-

dose una mayor autonomía energética. Seguiría siendo preciso almacenar el hidrógeno o el propelente y contar con el peso adicional que supone un reactor nuclear y sus sistemas de control y seguridad, pero se prevé que el balance sería aún positivo.

Durante las décadas de 1960 y 1970 se ensayaron los primeros prototipos de motor nuclear, aunque la llegada del ser humano a la Luna y la creciente percepción negativa de la energía nuclear por parte de la opinión pública hicieron que esta línea de investigación no fuera prioritaria. Con todo, al menos una docena de cohetes nucleares fueron probados en laboratorios en tierra, con excelentes resultados, y algunas agencias espaciales, como la rusa Roscosmos, han retomado esta línea de trabajo. Con la tecnología de reactores de núcleo sólido, un cohete de este tipo mejoraría considerablemente en rendimiento respecto a uno convencional, reduciendo el tiempo de vuelo de una misión al menos a la mitad, y contando además con combustible para la vuelta.

El factor límite sería la temperatura a la que llegara el gas, y con ello a la velocidad con la que se expulsaría el hidrógeno, que dependería solo de la resistencia de los materiales estructurales del propio reactor nuclear. Este límite podría incrementarse con reactores de núcleo gaseoso de nueva generación, en los que el uranio o plutonio se mantiene en forma de gas. De esta manera no se necesitaría una pesada estructura de soporte para el material fisible y la reacción nuclear en teoría podría alcanzar temperaturas muchísimo más altas. Un reactor de núcleo gaseoso reduciría el tiempo de vuelo hasta Marte a tan solo mes y medio, acelerando continuamente durante la primera mitad del viaje y decelerando durante la segunda, hasta llegar a Marte a una velocidad adecuada para situarse en órbita. Esta estrategia tendría la ventaja adicional de que la aceleración continua produciría una gravedad artificial durante todo el vuelo, que reduciría o eliminaría los efectos nocivos de la permanencia de los astronautas en ausencia de gravedad durante largos períodos de tiempo. El uso de la energía de la fusión nuclear, en lugar

de la de la fisión, eliminaría la necesidad de almacenar y calentar hidrógeno como fluido de trabajo: el mismo gas podría hacer el papel de combustible para la fusión y el helio resultante de la reacción nuclear sería usado como gas de escape para el impulso del cohete.

Aunque no se trata de una reacción nuclear, el uso de la antimateria seguiría unos procedimientos similares. La antimateria es similar a la materia que conocemos, pero con cargas eléctricas de signo contrario. El contacto entre materia y antimateria aniquila ambas y desprende una cantidad enorme de energía: se calcula que la aniquilación de 1 kg de materia y antimateria libera 1000 veces más energía que la que se puede obtener de la fisión de la misma masa de uranio. Sin embargo, la tecnología para generar y controlar antimateria se encuentra todavía lejos de resultar operativa para los vuelos espaciales.

Motores de iones para el vacío

En la búsqueda de sistemas de impulsión de bajo coste destaca la posibilidad de emplear motores iónicos, de los que existen diferentes diseños puestos a prueba con resultados positivos. Todos comparten el mismo principio de funcionamiento (fig. 2): en una cámara controlada magnéticamente se introduce un gas, cuyos átomos se ionizan bombardeándolos con los electrones proporcionados por un cátodo eléctrico. De esta manera se separan los electrones de los átomos del gas, que adquieren carga eléctrica positiva y se convierten en iones positivos o cationes. Una vez logrado, los iones pueden ser atraídos hacia el escape de la cámara mediante un campo eléctrico generado por unos electrodos de aceleración, que se dirigen en una misma dirección y con un mismo sentido, creando un empuje en la nave con sentido contrario. Para asegurarse de que los cationes sigan su camino y no sean atraídos de vuelta hacia la nave, que se cargaría con electricidad estática, justo a la salida hay una fuente de

Fig. 2

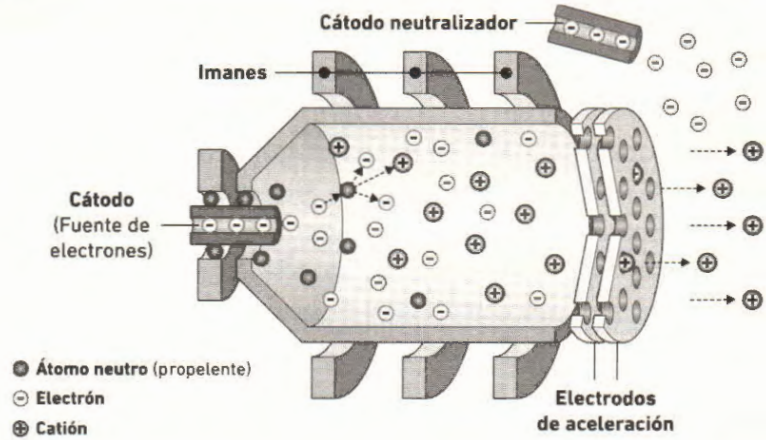


Diagrama de un motor iónico.

electrones, un cátodo que desioniza los átomos y los vuelve a hacer eléctricamente neutros.

Los motores iónicos alcanzan un elevadísimo impulso específico, siete veces mayor que el de un cohete de hidrógeno y oxígeno. Con todo, proporcionan poco empuje: hay que recordar que esta magnitud depende, además del impulso específico, del cociente entre las masas inicial y final: los motores iónicos expulsan pocos átomos cada vez, con lo que la pérdida de masa es muy baja. Un motor iónico no produce el empuje suficiente para hacer despegar un cohete desde la superficie de la Tierra, y además su funcionamiento óptimo se da en el vacío, por lo que como mucho podría ser el motor de la fase superior de un cohete multietapa.

Son motores con un bajo coste energético y de propelente. Dado que todo el motor es eléctrico, la fuente de energía pueden ser unos simples paneles solares. La misión más exitosa con un motor iónico es la sonda *Dawn*, lanzada en 2007 y que tras ocho años de viaje llegó hasta el planeta enano Ceres, cuya órbita está tres veces más

lejos de la órbita de la Tierra que la de Marte. La masa de propelente consumida por esta sonda, una vez lanzada al espacio por un cohete convencional, fue de menos de 400 kg.

Una posible mejora de los cohetes iónicos son los motores VASIMR (siglas de su denominación en inglés, *variable specific impulse magnetoplasma rocket*, que se traduce como cohete de magnetoplasma de impulso específico variable). Se trata de dispositivos experimentales en los que la ionización se consigue mediante ondas producidas por un generador de radiofrecuencias, que logra ionizar un gran número de átomos a la vez, al mismo tiempo que eleva su temperatura. El plasma caliente que se obtiene se dirige hacia la tobera confinándolo con campos magnéticos, pero antes de salir se vuelve a calentar con un segundo generador de radiofrecuencias, que emite en la frecuencia precisa para entrar en resonancia con el plasma, consiguiendo calentarlo por encima del millón de grados. El resultado final es que el plasma se expande con extremada rapidez y sale despedido a velocidades altísimas. El impulso específico de estos motores sería al menos 25 veces superior al de un motor de hidrógeno y oxígeno, y su empuje sería mayor que el de un motor iónico, aunque todavía mucho menor que el de los cohetes convencionales, por lo que necesitaría salir del campo gravitatorio planetario por otros medios.

Navegar a vela entre planetas

Una forma alternativa de explorar el espacio sería la de los veleros solares. El principio de este tipo de impulsor es conocido desde muy antiguo, pues es el mismo que el de la navegación a vela: una gran superficie recoge la fuerza del viento y empuja a la nave, que se mueve sin gasto de combustible. Pero ¿con qué viento se puede contar en el espacio interplanetario? La respuesta es el viento producido por la luz del Sol, capaz de ejercer una fuerza sobre la materia. Su acción en la Tierra es de unos 9 micronewtons por me-

tro cuadrado, equivalente a 1 kg de fuerza sobre una superficie de 100 hectáreas, es decir, si se pudieran poner sobre una báscula 100 hectáreas de terreno, veríamos que de día pesan 1 kg más que de noche. Es un empuje muy pequeño, por lo que, para ser eficaz, un velero solar necesitaría mástiles muy largos para sostener enormes velas, fabricadas con algún material de muy poca masa. Un velero solar de una tonelada requeriría una vela cuadrada de 190 m de lado para acelerar de 0 a 100 km/h en un día.

Una sonda lanzada desde la Tierra podría dirigirse hacia los planetas exteriores usando la luz del Sol, pero ¿cómo hacer el viaje de vuelta? Al contrario que un barco, un velero solar no necesita barloventear: el Sol ofrece la energía tanto para alejarse de él como para acercarse a su posición: si la luz solar apunta siempre hacia fuera de los límites exteriores, la gravedad solar lo hace en sentido contrario. Para acercarse al Sol, bastaría con maniobrar la vela de forma que el empuje de la luz frenara al velero y, una vez la nave perdiera suficiente impulso, la gravedad del Sol haría el resto.

Por otro lado, el Sol también emite un gran flujo de partículas cargadas de alta energía, el llamado *viento solar*, que podría ser aprovechado por un tipo especial de vela. Se trataría de las llamadas *velas eléctricas*, estructuras de varillas metálicas ionizadas con carga eléctrica positiva, que rechazaría las partículas con carga del mismo signo, dominantes en el viento solar. Esto proporciona un empuje hasta cinco veces mayor que el de las velas solares fotónicas, basadas en la luz, pero con el inconveniente de que el viento solar es inconstante y depende de la actividad solar, mientras que en todo momento se puede contar con la luz del Sol. Con empujes similares a los de los motores iónicos, la gran ventaja de los veleros de uno y otro tipo sería que no necesitarían ningún tipo de propelente, y su principal desventaja sería que a medida que se alejan del Sol su eficiencia se reduce.

Algunas sondas, como la *Mariner 10*, lanzada en 1973, han usado sus paneles solares como velas para controlar la inclinación de la

nave. En la década de 1990, las sondas soviéticas *Znamya* probaron con éxito la tecnología para desplegar velas en el espacio, como luego hizo NASA con el proyecto NanoSail-D, iniciado en 2008. La primera nave que consiguió navegar con éxito usando la luz solar fue la sonda japonesa *IKAROS*, lanzada en 2010. Con una vela solar cuadrada de 20 m de lado, pasó cerca de Venus y maniobró demostrando que es posible navegar por el sistema solar usando la luz del Sol. Esta sonda experimental se mantuvo continuamente operativa durante dos años.

Un motor para cada situación

Tanto los sistemas de impulsión nuclear como los de baja aceleración (motores iónicos y velas solares) no son aptos para despegar de la Tierra: en el primer caso, la radiactividad residual tendría un impacto ambiental inaceptable, y en el segundo, no se generaría el impulso mínimo para vencer la gravedad terrestre. Por ello, el uso de los cohetes químicos tradicionales no podría descartarse si no se ideara un sistema alternativo, capaz de operar en la primera fase de cualquier misión espacial.

En el caso de los sistemas de baja aceleración, los largos tiempos de tránsito necesarios hacen que no sean lo más adecuados para el transporte de seres humanos. Sin embargo, pueden ser la elección óptima para el transporte de bienes, materias primas y mercancías a lo largo y ancho del sistema solar. El uso de tecnologías híbridas, que unan desarrollos procedentes de diferentes líneas de investigación, ofrece posibilidades muy interesantes. Se podría, por ejemplo, diseñar una nave cuya vela fuera a la vez fotónica y eléctrica: si imaginamos la vela como un paraguas, la tela sería la vela solar y las varillas metálicas equivaldrían a la estructura de mástiles ionizados para aprovechar el viento solar. Una nave así podría tener además el complemento de un motor iónico. Otra sinergia posible sería emplazar un emisor de radiofrecuencias en el escape de un

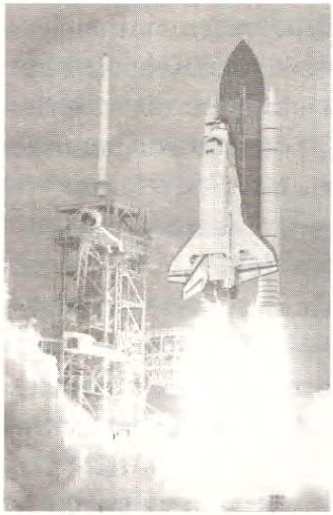
cohete nuclear, dado que el gas que escapa del reactor también es un plasma ionizado por las altas temperaturas: nada impediría que este plasma sufriera un segundo calentamiento, como ocurre en los motores VASIMR, y que con las temperaturas extremadamente altas se lograra un enorme impulso específico.

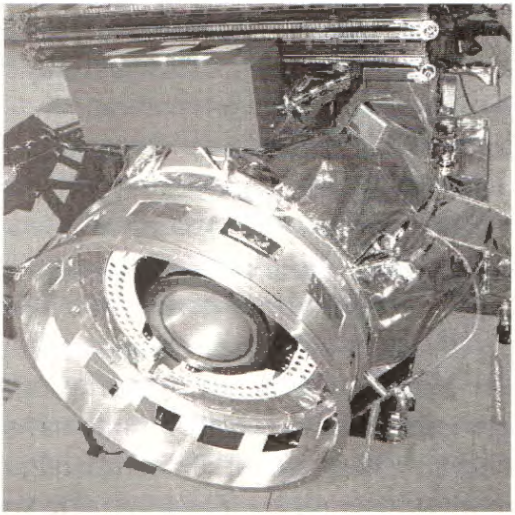
CATÁLOGO DE MANIOBRAS ESPACIALES

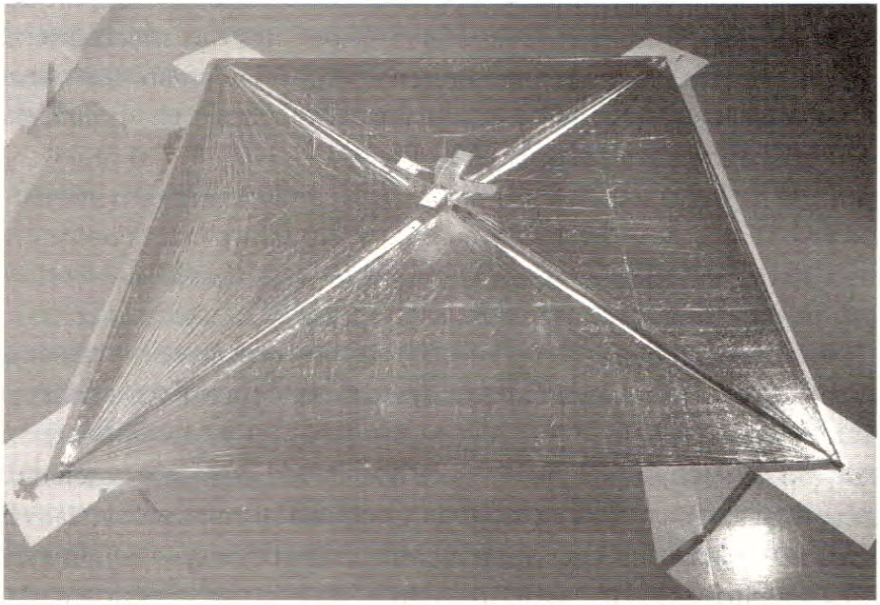
Una vez determinado el sistema de impulso de una misión espacial, el siguiente paso para lograr una navegación efectiva es el control del movimiento. A diferencia de cualquier otro sistema de transporte, en astronáutica no hay lugar para la improvisación: cada cambio de velocidad o de dirección debe obedecer a un objetivo, porque las condiciones de estos viajes son tan exigentes que no permiten malgastar tiempo ni energía. Así, cualquier misión espacial debe estar planificada de antemano, previendo la secuencia completa de las maniobras a realizar desde el despegue hasta el final previsto, sea este el retorno de una cápsula tripulada a la Tierra, el descenso de una sonda sobre otro cuerpo celeste o dejar situado un satélite en una órbita estable.

El primer paso hacia el espacio

La primera maniobra espacial a la que se enfrenta cualquier misión astronáutica es escapar de la gravedad terrestre. Si se lanza un objeto hacia arriba a baja velocidad, sube hasta que invierte su movimiento y cae de nuevo al suelo. Este proceso depende de la velocidad inicial que se consigue: cuanto mayor sea, más tiempo durará la trayectoria ascendente y hasta mayor altura subirá el objeto. Pero si en el lanzamiento se superan los 40 320 km/h, el objeto ya no vuelve a caer. Esta velocidad se conoce como *velocidad de*







— Diferentes sistemas de impulsión para la navegación en el espacio. Despegue del transbordador *Discovery* (arriba a la izquierda), lanzado por cohetes químicos. Motor iónico de la sonda *Deep Space 1* (arriba a la derecha), durante el proceso de montaje en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA. Sonda experimental *NanoSail-D* (abajo), con su vela solar desplegada en la nave de montaje.

escape de la Tierra: cualquier cuerpo lanzado desde la superficie de nuestro planeta a esa velocidad o a una mayor, escapará para siempre de su atracción gravitatoria. Puesto que la fuerza de atracción gravitatoria aumenta con la masa, un astro más masivo requerirá una velocidad de escape más elevada, y uno más ligero tendrá una velocidad de escape baja: por ello es más difícil escapar de Júpiter que de la Tierra, y más fácil hacerlo desde la Luna.

En resumen, la velocidad de escape es la velocidad mínima necesaria para que un cuerpo logre zafarse de la atracción gravitatoria de un astro. Dicho en lenguaje astronáutico, la velocidad de escape de la Tierra es el delta-v necesario para alejarse sin retorno de la Tierra. Hay que tener en cuenta, además, el efecto del rozamiento atmosférico y el hecho de que el planeta tiene un movimiento de rotación alrededor de su eje, que hace que sea más fácil lanzar un cohete hacia el este que hacia el oeste, pues así a su velocidad se suma la de rotación, en lugar de restársele. Por ello, el lugar ideal para emplazar una base de lanzamiento de cohetes es el ecuador, donde la velocidad lineal de giro es mayor.

Primera parada

Tras el despegue, el primer objetivo de las misiones es conseguir alcanzar una órbita de baja altitud o LEO; suele ser también el destino de la mayoría de las misiones tripuladas, pues es en la región de las LEO donde está situada la Estación Espacial Internacional, el principal destino de los astronautas. El delta-v necesario para alcanzar una LEO desde la superficie de la Tierra varía en función de factores como el lugar de lanzamiento, la dirección de despegue o la aerodinámica de la nave, y también de cómo acelere el cohete a bajas altitudes y de la forma de la curva que dibuje su trayectoria ascendente. Los valores más frecuentes se encuentran entre 30 000 y 36 000 km/h.

Si se compara este delta-v con la velocidad de escape de la Tierra, se observa que subir hasta una LEO requiere más de las dos terceras partes del impulso inicial de cualquier viaje. La situación es, en realidad, algo más compleja, ya que para llegar, por ejemplo, hasta Marte no basta con escapar de la gravedad terrestre: hay que vencer también la del Sol. Con todo, cuesta mucho más llegar a la órbita LEO desde la base de lanzamiento (viene a ser un 60 % del total) que ir de esa órbita hasta Marte. Si un cohete pudiera reabastecer de combustible su primera etapa en una LEO, tendría en principio energía suficiente para completar el resto del trayecto y alcanzar el planeta rojo. Otra cosa es cuánto tardaría en llegar, y es que el coste en delta-v para ir de un lugar a otro del sistema solar está en función de las conocidas como *órbitas de transferencia de Hohmann*, muy eficientes por lo que respecta al consumo de energía, pero que se deben recorrer a velocidades relativamente lentas.

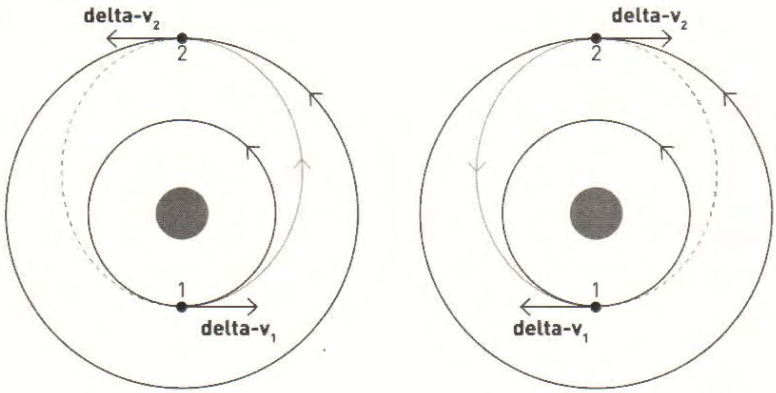
Saltar entre órbitas

Cuando imaginamos un objeto orbitando alrededor de un astro tendemos a pensar en términos de movimientos circulares. De hecho, las órbitas de los planetas alrededor del Sol y también las de buena parte de satélites artificiales alrededor de la Tierra son elipses con muy poca excentricidad, es decir, muy parecidas a un círculo. Sin embargo, las órbitas que se adentran en el espacio lejano son elipses muy excéntricas, con un eje mucho mayor que el otro, como las que siguen algunos cometas alrededor del Sol. En una órbita elíptica, el astro alrededor del cual se orbita se encuentra situado en uno de los dos focos de la elipse. Cuando el objeto orbital pasa por la posición más cercana al astro se dice que se halla en el periastro (en el caso de la Tierra el periastro recibe el nombre de *perigeo*, y en el del Sol, *perihelio*), que es el momento en que se alcanza la mayor

velocidad; cuando llega al punto más alejado, está en su apoastro (*apogeo* para la Tierra, *afelio* para el Sol), y se mueve con la velocidad más lenta de las que desarrolla.

Las órbitas de transferencia de Hohmann hacen uso de estas características para minimizar el coste energético de cambiar de una órbita cuasi circular a otra. Para ello, se usa una órbita elíptica en la cual el periastro coincide con una de las órbitas y el apoastro con la otra. En la figura 3 se muestran dos ejemplos: en el de la izquierda, la nave pasa de una órbita circular de baja altitud alrededor de la Tierra a otra de mayor altitud. Para ello, al llegar al punto 1 incrementa su velocidad en un delta-v_1 que le hace pasar a una órbita elíptica (trazada en el esquema con una línea discontinua). El incremento de velocidad ha de ser exacto para que el apogeo de la nueva órbita (punto 2) coincida con la órbita final. Si la nave no hiciera nada más mantendría la órbita elíptica y regresaría al punto 1, estabilizando este trayecto de forma indefinida. Para que esto no ocurra, al llegar al punto 2 es necesario

Fig. 3



Esquema de las órbitas de transferencia de Hohmann para pasar de una órbita baja a otra más alta (izquierda) y para realizar el proceso inverso (derecha).

un nuevo incremento de la velocidad, la cantidad justa para convertir la órbita elíptica en circular y pasar a la órbita definitiva. El delta-v total de la maniobra será la suma de los dos incrementos de velocidad.

La órbita elíptica que facilita este proceso es una órbita de transferencia de Hohmann. No es el camino más corto entre los puntos 1 y 2, pero cualquier otro camino, aunque fuera más rápido, supondría también un delta-v total superior y, por tanto, un gran incremento del consumo energético.

El ejemplo de la derecha es justo la maniobra opuesta, pasar de una órbita de mayor altitud a otra de más baja. En este caso, la nave sigue al inicio la órbita más alejada del planeta, y al llegar al punto 2 lo que debe hacerse para entrar en la órbita elíptica requerida es perder velocidad (por ello, la flecha del delta-v apunta en dirección contraria a la del avance orbital). Una vez más, al llegar al punto 1 se debe volver a frenar para estabilizar la nueva órbita circular y evitar volver al punto 2.

Este mismo tipo de maniobra se puede utilizar para alcanzar otro planeta desde la Tierra o volver desde él: basta con suponer que el círculo central de la figura es el Sol y las dos órbitas circulares son las de los planetas. Si, por ejemplo, la órbita exterior es la de la Tierra y la interior es la de Venus, el diagrama de la derecha correspondería a un viaje a Venus y el de la izquierda a la vuelta; si consideramos que la órbita de la Tierra es la interior y la exterior corresponde, por ejemplo, a la de Marte, el diagrama de la izquierda describiría el viaje a Marte y el de la derecha el de retorno. El delta-v_1 que hay que usar para pasar desde la órbita terrestre a la de Marte es de unos 6 000 km/h (prescindiendo de la fuerza gravitatoria de la Tierra).

Para que la órbita de transferencia de, por ejemplo, un viaje a Marte sea completamente efectiva es muy importante que cuando la nave llegue a su destino el planeta se encuentre en el punto en el que su órbita contacta con la de transferencia, y no en

cualquier otro lugar. Las condiciones astronómicas que cumplen este requisito solo se dan una vez cada 780 días y se mantienen por poco tiempo, durante un período que se conoce como *ventana de lanzamiento*. En las condiciones más favorables, la nave ha de conseguir primero la velocidad de escape terrestre, lo que desde la órbita LEO supone un delta-v adicional de unos 11 000 km/h, y además al llegar a Marte debe frenar con el fin de ponerse en órbita, para lo que hace falta un delta-v de unos 5 000 km/h. En total, desde una LEO hasta Marte, hace falta desarrollar un delta-v promedio de 22 000 km/h.

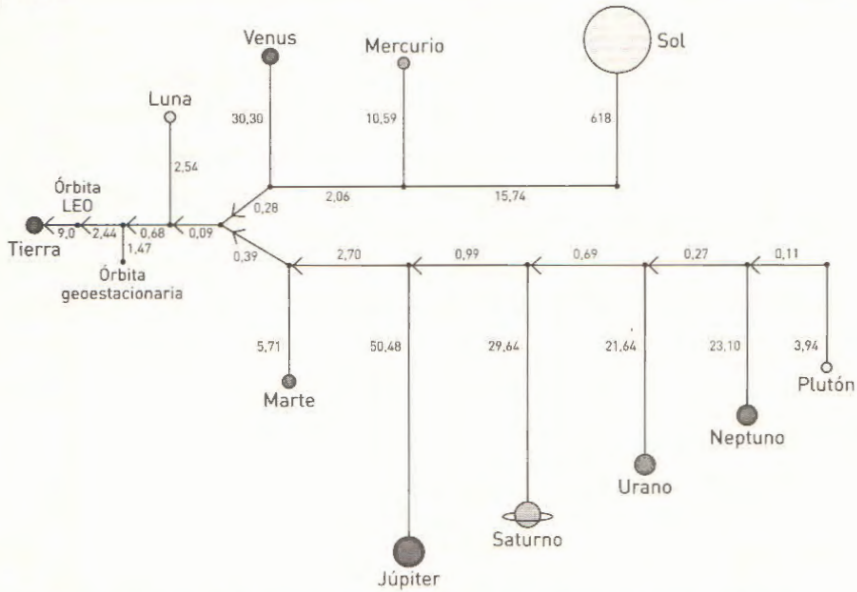
Mapas de gastos

Los mapas de delta-v, como el de la figura 4, son esquemas en los que se evalúa la dificultad de realizar maniobras entre los planetas y satélites del sistema solar y de algunas situaciones orbitales de interés, como las órbitas bajas, las geoestacionarias y el escape del campo gravitatorio generado por cada cuerpo. Estos puntos están unidos mediante segmentos a los que se asocia un valor numérico, que representa el valor de delta-v necesario para desplazarse entre sus extremos.

Estos mapas facilitan la tarea de cuantificar la inversión energética necesaria para realizar un viaje espacial, que se obtiene sumando los valores de delta-v de cada uno de los tramos que lo componen. Si, por ejemplo, queremos obtener el delta-v total para un vuelo desde una LEO terrestre hasta la Luna, sumamos el valor de esta magnitud correspondiente al tramo desde la LEO hasta una órbita geoestacionaria, más el que se asigna desde esta última hasta la Luna.

Se suelen elaborar teniendo en mente cohetes convencionales, que solo encienden sus motores en los momentos clave y usan órbitas de transferencia de Hohmann a fin de minimizar los costes energéticos. Para un cohete iónico de bajo impulso que consigue

Fig. 4



Mapa de delta-v para los viajes desde la Tierra a los principales astros del sistema solar. El número sobre cada tramo corresponde al delta-v necesario, expresado en kilómetros por segundo.

una aceleración sostenida durante largos períodos de tiempo, los cálculos son totalmente diferentes.

Caer para elevarse

Aunque las órbitas de transferencia Hohmann son muy eficientes, hay formas de optimizar todavía más el consumo de energía en un vuelo espacial. Una es mediante el efecto Oberth: supongamos que tenemos una nave viajando a cierta velocidad pero que necesita incrementarla en un cierto delta-v para alcanzar su objetivo final; si en su trayectoria intermedia pasa cerca de otro astro, puede dirigir-

se hacia él, intentando pasar cuanto más cerca mejor, y realizar el aumento de velocidad justo en el momento de máxima cercanía.

La ventaja de esta maniobra aprovecha dos factores: por un lado, el hecho de que, al caer hacia un astro, la velocidad de la nave aumenta por efecto de la atracción gravitatoria, en mayor grado cuanto más cerca se pasa del astro; y por otro, que la energía cinética depende de la velocidad al cuadrado. Si el cohete realiza su delta-v activando sus motores en el momento de máxima cercanía y, por tanto, de máxima velocidad, el incremento en energía será más efectivo, de manera que cuando la nave se aleje del planeta, se encontrará que ha adquirido un delta-v que es en realidad mucho mayor que el proporcionado por sus motores. En resumen, el efecto Oberth consiste en un aumento extra de energía cinética y velocidad que se consigue a costa del campo gravitatorio del astro.

No hay que confundir esta maniobra con la asistencia gravitatoria, en la que el incremento de velocidad se debe solo a la gravedad del planeta cerca del que se realiza. Aunque ambas maniobras tienen en común que hay que acercarse mucho al astro, la asistencia gravitatoria consigue obtener un delta-v positivo sin realizar ningún consumo de combustible, pero solo es posible realizarla bajo alineaciones muy concretas entre la nave y el astro. Para que sea rentable, es imprescindible que el astro se mueva a gran velocidad.

Para entender los fundamentos del efecto Oberth se puede usar la siguiente analogía. Supongamos que los planetas son grandes esferas de goma moviéndose a gran velocidad alrededor del Sol, y la nave una minúscula bola de goma que viaja a una velocidad moderada. Si la nave choca frontalmente con un planeta, rebotará hacia atrás a altísima velocidad, y el planeta perderá un poco de velocidad, aunque dada su enorme masa, será inapreciable: se habrá conseguido transferir una enorme cantidad de energía cinética del planeta a la nave. La medida de esta transferencia no será la misma en un choque frontal que en otro que se produzca con un cierto ángulo: dependiendo de las condiciones del choque la nave podría

incluso perder velocidad. Si se escogen las condiciones óptimas, la velocidad final de la nave puede llegar a ser igual a su velocidad inicial, más el doble de la velocidad del planeta.

Aunque la interacción gravitatoria es diferente al choque elástico, en lo que a transferencia de energía se siguen los mismos principios. En un encuentro de una nave con un planeta, al caer hacia el planeta y volver a escapar, y dependiendo de las direcciones iniciales y finales, la nave puede llegar a incrementar su velocidad tanto como en la analogía de las bolas de goma. Y, por supuesto, se pueden usar a la vez tanto el efecto Oberth como la asistencia gravitatoria en una misma maniobra. En ambos casos, cuanto más cerca se consiga pasar del planeta, mejor será el resultado.

Las autopistas del sistema solar

Las maniobras gravitatorias descritas tienen la virtud de ser matemáticamente sencillas: la mecánica orbital permite en estos casos simplificar los problemas, considerando únicamente el efecto del cuerpo central. Así, para órbitas y maniobras alrededor de la Tierra se tiene en cuenta solo la gravedad terrestre, y se ignoran los efectos gravitatorios del Sol o de la Luna, que producen minúsculas variaciones. De igual manera, en un viaje hasta otro planeta solo se debe considerar la gravedad terrestre para calcular las primeras maniobras de escape. Durante el recorrido hasta el planeta será la gravedad del Sol el único componente a tener en cuenta, obviando el resto de fuentes gravitatorias. Por su parte, la gravedad del planeta de destino se toma en consideración una vez sea necesario entrar en su órbita. Este método de cálculo de órbitas a tramos, llamado *aproximación de cónicas parcheadas*, da excelentes resultados y es muy preciso, aunque deja fuera posibilidades muy interesantes desde el punto de vista del consumo energético. Y es que tener en cuenta todas las fuentes de gravitación, aunque complique los cálculos, tiene su recompensa.

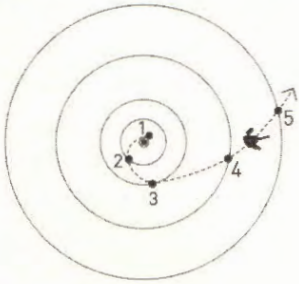
Consideremos el sistema Tierra-Sol, separados por unos 150 millones de kilómetros. Hay un punto situado a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra (es decir, cien veces más cerca que el Sol) donde la gravedad de la Tierra y la del Sol se contrarrestan exactamente y algo situado ahí se mantiene en equilibrio: se trata del primer punto de Lagrange, que se suele denominar L1. En dirección contraria, alejándose del Sol y también a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra, hay un segundo punto de equilibrio, el L2, donde la fuerza centrífuga del giro alrededor del Sol se contrarresta exactamente con las gravedades sumadas del Sol y la Tierra. Existen otros tres puntos de equilibrio gravitatorio adicionales (L3, L4 y L5), pero los dos primeros son los que resultan fácilmente accesibles desde la Tierra y más interesantes para el viaje interplanetario.

Consideremos ahora el sistema Luna-Tierra, separadas por unos 380 000 km. De nuevo encontramos puntos de equilibrio del campo gravitatorio: el primer punto de Lagrange, donde la gravedad terrestre y la lunar se contrarrestan, se encuentra a unos 40 000 km de la Luna, y el segundo punto de Lagrange, donde la fuerza centrífuga del giro alrededor de la Tierra se contrarresta con las gravedades sumadas de la Luna y la Tierra, se halla situado a 60 000 km más allá de la Luna. En la figura 5 se esquematizan las posiciones y órbitas de los tres astros y de los puntos de Lagrange descritos.

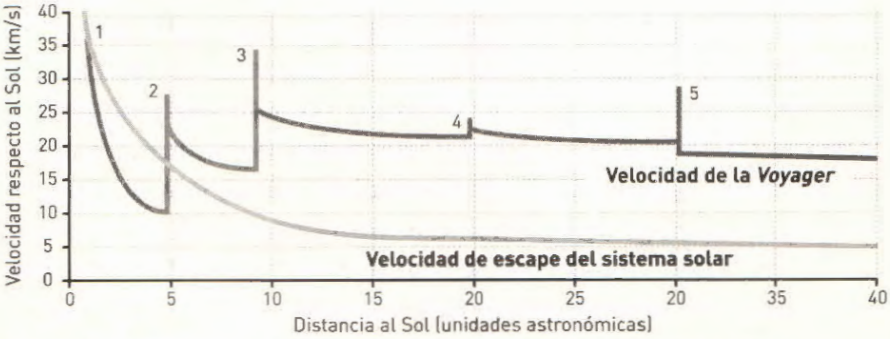
Aunque a largo plazo los puntos de Lagrange son inestables, una nave dejada libremente en uno de ellos puede mantenerse allí durante meses y hacerlo de forma indefinida con pequeñas correcciones, a muy bajo coste energético. Por ello, son ideales para misiones espaciales de larga duración. Se han utilizado para emplazar varias sondas: *WMAP* y *Planck*, destinadas a estudiar el fondo cósmico de microondas, se situaron en TL2, a la sombra de la Tierra y sin interferencias del Sol; la sonda *Genesis* para el estudio del viento solar y el observatorio solar *SOHO* se mantuvieron en TL1, para tener una buena visión del Sol. Estas naves no se sitúan exactamente en el

> EL GRAN TOUR DE LA VOYAGER 2

El lanzamiento de la nave *Voyager 2* en 1977 aprovechó una especial configuración planetaria que le permitió visitar todos los planetas exteriores del sistema solar, usando la asistencia gravitatoria obtenida del encuentro con cada planeta para obtener los incrementos de velocidad necesarios para alcanzar el siguiente. No se volverá a dar una configuración similar hasta el año 2151. La trayectoria que llevó a la *Voyager 2* hasta Júpiter no era una órbita de transferencia de Hohmann, con la cual hubiera tardado casi tres años en llegar, sino un recorrido mucho más rápido y directo, de menos de dos años. Tras el encuentro con Júpiter, la sonda consiguió casi triplicar su velocidad gracias a la gravedad del gigante gaseoso, logrando superar la necesaria para el escape del sistema solar. Este tipo de maniobra se repitió al paso por Saturno, Urano y Neptuno.



1. Lanzamiento desde la Tierra (20 de agosto, 1977)
2. Asistencia gravitatoria en Júpiter (9 de julio, 1979)
3. Asistencia gravitatoria en Saturno (25 de agosto, 1981)
4. Asistencia gravitatoria en Urano (24 de enero, 1986)
5. Asistencia gravitatoria en Neptuno (25 de agosto, 1989)



— Esquema del recorrido de la *Voyager 2* por el sistema solar y gráfico de las velocidades alcanzadas por la sonda.

Fig. 5

Posiciones de los puntos 1 y 2 de Lagrange del sistema Sol-Tierra (TL1 y TL2) y del sistema Tierra-Luna (LL1 y LL2).

punto de equilibrio, sino girando alrededor de él en una órbita que recibe el nombre de *órbita en halo*.

Casualmente, los niveles energéticos de los puntos LL1 y TL2 son muy similares, y por ello el delta-v requerido para pasar de uno a otro es muy pequeño, de tan solo 0,014 km/s. Esto hace de LL1 un emplazamiento ideal para una estación espacial permanente, que tendría fácil acceso a la Luna y a la cual podría llegar con muy poco esfuerzo cualquier satélite situado en TL2 que se averiara, para ser reparado y posteriormente devuelto a su posición original. Pero ¿hay más rutas de bajo coste energético como esta? La respuesta es que sí.

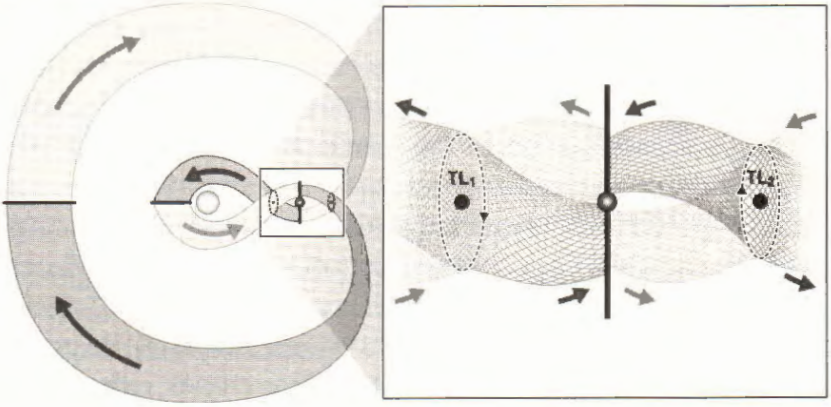
El verdadero interés de los puntos de Lagrange para la exploración espacial reside en que su inestabilidad es de naturaleza caótica. Sin correcciones, una nave situada en una órbita en halo, al cabo de un tiempo se irá alejando más y más del punto de Lagrange, sin necesidad de consumir propelente. Dónde acabará la nave es arduo de decir, pues por la propia naturaleza de los sistemas caóticos, una pequeña perturbación puede producir resultados finales radicalmente distintos. Es muy difícil calcular con precisión la trayectoria final, pero mediante cálculo masivo por computador es por fin posible hacerlo.

Lo que puede parecer un problema es en realidad una ventaja: en términos astronáuticos, una pequeña perturbación quiere decir una pequeña delta-v, y por ello solo con cambiar muy poco la velocidad se tienen a disposición una enorme variedad de destinos. El estudio matemático de las inestabilidades de los puntos de Lagrange muestra que existen familias de trayectorias que se alejan formando un tubo, alrededor del cual se enrollan grupos de trayectorias. Por cada tubo que se aleja existe otro que se acerca al punto de Lagrange: de hecho, cerca de cada punto inestable de Lagrange existen multitud de tales pares de tubos, enroscándose de una forma muy compleja y yendo en múltiples direcciones, extendiéndose muy lejos de la región de origen. En la figura 6 se representan algunos tubos de trayectorias que llevan o alejan a los puntos de Lagrange TL1 y TL2.

Las intersecciones entre estos tubos de ida o venida se pueden usar para saltar de un tipo de trayectoria a otro con muy poca delta-v, y así hacer viajes de ida y vuelta entre ambos puntos de Lagrange con muy poco gasto de energía. También permiten acercarse al Sol o pasar a una órbita más lejana. Más interesante aún resulta el hecho de que algunos de estos tubos de trayectorias se cruzan en ocasiones con los de otros sistemas, como los de Marte, Júpiter o Saturno. Con un pequeño delta-v es posible saltar a uno de aquellos y así viajar casi sin gasto energético, por ejemplo, hasta Júpiter (o incluso sin ningún gasto, pues hay trayectorias de consumo cero que siguen de forma natural algunos asteroides y cometas, como el cometa 39P/Oterma). La configuración exacta de estos tubos de trayectorias cambia a cada momento, dependiendo de la posición de los planetas. El conjunto conforma la que ha sido bautizada como Red de Transporte Interplanetario (ITN, por sus siglas en inglés), que sin el poder de cálculo de los supercomputadores nunca habría sido descubierta.

Algunas misiones espaciales han usado ya las carreteras de esta autopista, como la sonda *Genesis*, que logró llegar hasta TL1 con muy poco gasto energético, por lo que solo el 5% de su masa era

Fig. 6



Esquema de los tubos de trayectorias de los puntos de Lagrange del sistema Sol-Tierra.

propelente. En comparación, la misión *SOHO* siguió un recorrido más rápido y directo hasta el mismo destino, por lo que tuvo que dedicar el 50% de su masa al propelente. Una estrategia parecida fue aplicada a la misión china *Chang'e 2*, que pasó de una órbita lunar hasta el punto TL2, y de allí voló hasta el asteroide 4179 Toutatis, usando otra de las rutas de la ITN.

Esto aumenta el atractivo de situar una estación espacial permanente en LL1, pues además de servir como estación de reparación de satélites, sería un excelente punto de partida para misiones al resto del sistema solar, convirtiéndose en un portal de acceso a la Red de Transporte Interplanetario. Aunque los astronautas viajasen mediante vehículos más veloces, desde aquí se podrían enviar suministros usando rutas lentas de poco consumo energético. Aunque se sabe que hay trayectorias sin ningún consumo energético, tales rutas requieren tiempos de vuelo enormes: un vuelo de este tipo hasta Marte llevaría miles de años, por lo que el viaje gratuito no parece tener aplicaciones prácticas.

TREPAR HASTA EL CIELO

Como hemos visto, la mayor parte del consumo energético de un vuelo espacial se emplea en despegar de la Tierra. Una vez en órbita, los costes son mucho menores. Pero ¿es posible escapar de la gravedad, gastando menos? En principio sí, con un ascensor espacial. En su concepción más básica, consiste en una estación espacial en órbita geoestacionaria (a 36 000 km de altura) unida a tierra mediante un largo cable anclado en algún lugar del ecuador. La carga subiría hasta la estación mediante unos vagones robot que treparían por el cable hasta su destino, en un viaje que duraría en torno a un mes, llevando toda clase de materiales hasta el espacio.

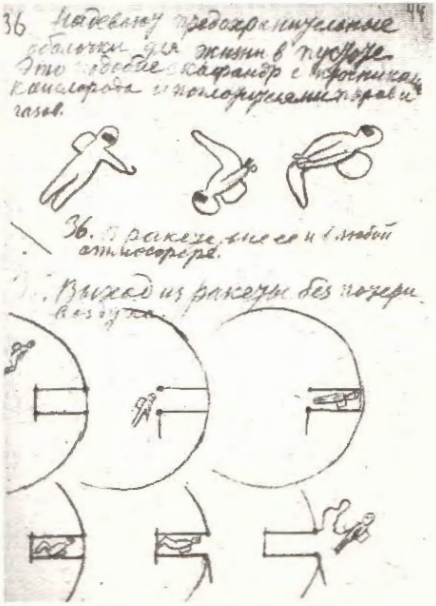
Uno de los principales problemas de este proyecto es encontrar un material capaz de soportar la enorme tensión a la que estaría sometido el cable de anclaje. Los nanotubos de carbono trenzados podrían ser la respuesta. Las pruebas de laboratorio han mostrado que un cable de este material tiene una resistencia a la tensión cientos de veces mayor que el acero, más que suficiente para el ascensor espacial. Cuando se desarrollen los procedimientos para desarrollar cables de nanotubos de la longitud necesaria, la mejor forma de construir un ascensor espacial será de arriba abajo, comenzando con la estación en órbita geoestacionaria y descolgando desde allí poco a poco el cable, hasta anclarlo en tierra en el lugar elegido. Pero eso no bastaría: si esta configuración se dejara como está, el ascensor acabaría cayendo por su propio peso, pues el cable tiraría hacia abajo de la estación. Para evitarlo, la solución es hacer el cable más largo y anclarlo a un contrapeso que esté más allá de la órbita geoestacionaria, donde la fuerza centrífuga es más intensa que la atracción gravitatoria: así se tensaría el sistema, evitando el colapso del ascensor. Este contrapeso podría ser un pequeño asteroide, que se podría capturar con poco coste de energía usando la Red de Transporte Interplanetario.

El proyecto de un ascensor espacial fue descrito por primera vez por Konstantín Tsiolkovski en 1895. Una variante más sugestiva es la torre orbital. El concepto en que se basa es el mismo, pero en vez de un cable se trata en esta ocasión de un auténtico edificio, una torre que se eleva desde el suelo hasta el espacio, yendo más allá de la órbita geoestacionaria. Por los mismos motivos que antes, su construcción comenzaría desde la órbita geoestacionaria, construyéndola al mismo tiempo hacia la Tierra y hacia el espacio, de manera que la atracción gravitatoria que afectaría a la parte inferior de la torre se compensaría con la fuerza centrífuga en la parte superior. Inicialmente la torre crecería al mismo ritmo hacia arriba y hacia abajo, pero dado que la fuerza gravitatoria aumenta con la distancia al cuadrado, mientras que la fuerza centrífuga lo hace linealmente, la atracción gravitatoria aumentará en intensidad más rápidamente, por lo que pronto habría que seguir construyendo la torre hacia arriba y no hacia abajo para mantener equilibrado el sistema. Suponiendo una torre de estructura más o menos uniforme, cuando se hubieran construido ya unos 20 000 km hacia abajo, habría que tener construidos unos 30 000 km hacia arriba para que actuara a modo de contrapeso y se mantuviera equilibrada en su órbita geoestacionaria. Cuando la torre llegara hasta el suelo, quedaría anclada en el planeta, y para mantener el equilibrio entre gravitación y fuerza centrífuga se habrían tenido que construir hacia arriba, por encima de la órbita geoestacionaria, más de 100 000 km, dando a todo el edificio una altura total de unos 150 000 km, aproximadamente un tercio de la distancia a la Luna. Si se acepta una altura de 3 m por planta, el total del edificio tendría unos 50 millones de plantas.

En resumen, existe un gran número de alternativas técnicas para conseguir salir al espacio y navegar por el sistema solar de forma fiable, que comprenden desde los distintos tipos de impulsores (cohetes, motores nucleares e iónicos, veleros espaciales) hasta la construcción de grandes estructuras de ingeniería que literalmen-

> EL PADRE DE LA ASTRONÁUTICA

La figura del físico ruso Konstantín Tsiolkovski (1857-1935) se reconoce unánimemente como la del fundador de la astronáutica, a la que dotó de sus bases teóricas. Dirigió su atención a los problemas del vuelo, primero diseñando dirigibles y aviones, y luego abordando las condiciones necesarias para los viajes espaciales. En 1902 diseñó una nave-cohete que anticipaba los conceptos expuestos en su obra *La exploración del espacio cósmico mediante motores a reacción*, publicada al año siguiente y considerada la piedra angular para el posterior desarrollo de la tecnología espacial. Estableció la ecuación fundamental del cohete, que se conoce como ecuación de Tsiolkovski, y en las más de 500 obras que publicó sobre astronáutica, anticipó soluciones como la de los cohetes por etapas y el ascensor espacial.



— Konstantín Tsiolkovski en su taller y una página manuscrita de una de sus obras, en la que anticipó el equipamiento de un cosmonauta y el proceso de salida desde una nave espacial, mediante un sistema de esclusas estancas.

te suben hasta el espacio. Una vez conseguido el primer salto, se cuenta con varias estrategias para aprovechar las leyes de la física, en particular las que rigen la mecánica orbital, para lograr un alto grado de eficiencia de las misiones espaciales. Sin embargo, hay que recordar que todos estos avances tecnológicos, que se sitúan entre los logros tecnológicos más sofisticados de la humanidad, son solo el primer peldaño para una empresa de un alcance mucho mayor y más complejo: la expansión del ser humano por el sistema solar y, en un futuro más lejano, más allá de sus confines.

03 ADAPTARSE AL ESPACIO

Salir al espacio pone a prueba nuestras capacidades tecnológicas hasta el límite. Con todo, no es sino el requisito previo para un reto aún más exigente: la supervivencia del ser humano fuera de su ambiente natural. Para lograr este empeño, hay que examinar todas las necesidades de nuestra especie y hallar la manera de cubrirlas frente a los medios más extremos imaginables.

El ser humano está adaptado a las condiciones ambientales concretas de la Tierra, y por ello su supervivencia en el espacio solo se puede asegurar mediante un importante despliegue tecnológico, cuyo objetivo básico es reproducir de la forma más eficiente aquellos parámetros (atmósfera respirable, presión, temperatura, gravedad, nivel de radiación, etc.) sin los cuales el ser humano quedaría confinado en su planeta de origen. Tanto los trajes espaciales, como los distintos tipos de astronaves pilotadas, las estaciones orbitales y las colonias sobre otros planetas, deberán dar solución a este reto, frente a condiciones exteriores distintas, por lo que las estrategias y los elementos técnicos que se apliquen serán muy diversos. La larga experiencia de permanencia humana en el espacio acumulada en la Estación Espacial Internacional ha servido para identificar los problemas a solventar y ensayar algunas tecnologías pioneras en este campo, que han encontrado también aplicaciones en la Tierra. El astronauta o el colono espacial serán los protagonistas de la expansión de la humanidad, por lo que sus necesidades tomarán un relieve de primer orden.

UN DÍA EN LA VIDA EN EL ESPACIO

La duración del día, que en la Tierra sigue un ciclo de 24 horas, deja de tener sentido una vez se sale al espacio. Para ilustrarlo, se puede examinar lo que pasa en la Estación Espacial Internacional, que orbita a unos 400 km sobre la superficie del planeta. Para mantener su órbita estable a esa altura y compensar la atracción gravitatoria terrestre, su velocidad ha de ser de unos 28 000 km/h, lo que implica que, en un período de 24 horas, los astronautas a bordo ven quince veces amanecer y anochecer. Por poner otro ejemplo, en una hipotética estación permanente sobre la Luna, tras la salida del Sol habría que esperar casi quince días a que se pusiera y llegara la noche, que duraría otros tantos hasta un nuevo el día, pues el día lunar dura 29 días terrestres. En el caso de un futuro viaje a Marte, por definición no habría día y noche, pues siempre habría un lugar de la nave desde el que se pudiera ver el Sol.

El cuerpo humano evolucionó en un mundo con ciclos día/noche de 24 horas, la base del llamado *ciclo circadiano*, que regula muchos procesos fisiológicos, y cualquier alteración del mismo hace que nuestra biología se resienta, apareciendo desde afecciones leves pero molestas, como el *jet lag* que se experimenta en viajes de larga distancia en avión, hasta dolencias más graves, como enfermedades hepáticas o cardíacas que se pueden cronificar, trastornos psíquicos y otros males que, en casos extremos, pueden llegar a ser fatales. Por ello, los horarios de los astronautas se rigen por la hora terrestre, referida al centro de control de la misión, y no por el ciclo que se experimenta en su nave.

En la Estación Espacial Internacional (ISS), donde se dan las estancias más prolongadas en el espacio, el tiempo dentro de un día estándar de 24 horas se suele repartir de la siguiente manera: 10 horas de trabajo, 3 horas de ocio (que incluyen las comidas), 2 horas y media de ejercicios físicos y 8 horas y media de sueño, según el horario típico de la siguiente tabla:

06:00 AM	Inicio de la jornada. Aseo, desayuno y lectura de los mensajes y noticias recibidos durante la noche.
07:30 AM	Teleconferencia de planificación diaria con el control de misión en tierra.
07:55 AM	Preparación del trabajo y revisión de los procedimientos de apoyo para las actividades del día.
08:15 AM	Tiempo de trabajo: experimentos científicos, mantenimiento, operaciones de estiba, muestreo ambiental y tareas médicas (incluye ejercicio diario).
01:00 PM	Comida.
02:00 PM	Tiempo de trabajo. (Se repite el programa de las 08:15.)
06:15 PM	Preparación del trabajo nocturno, procedimientos de revisión y cronología para el día siguiente.
07:05 PM	Discusión sobre los trabajos del día y sobre posibles cambios en el plan para el día siguiente.
07:30 PM	Cena, envío de correos electrónicos y ocio en general.
09:30 PM	Fin de la jornada.

Higiene en ingravidez

El aseo matutino, con el que empieza la actividad diaria, no resulta nada fácil en ingravidez. El agua tiene una tensión superficial —la fuerza que cohesiona la superficie de un líquido— relativamente elevada, que hace que, en ausencia de gravedad, se pegue a cualquier objeto. Por ello, una ducha que inyectara agua a presión haría que el astronauta corriese el riesgo de ahogamiento, pues gran parte del agua se quedaría pegada a su cuerpo, envolviéndolo.Los astronautas recurren a una alternativa: se lavan con trapos húmedos jabonosos y para la cabeza usan un champú sin agua que no necesita aclarado. Para hacer posible el afeitado se usa una pasta de afeitar que se pega a la cuchilla y que hay que ir limpiando con una toalla para evitar que se aleje flotando. También puede usarse una maquinilla eléctrica acoplada a un sistema de aspiración para succionar el vello. De hecho, algunos astronautas optan por

dejarse la barba durante la misión. Por razones similares, tampoco se puede hacer funcionar una lavadora en el espacio, por lo que los astronautas usan ropa desechable, que se reemplaza al cabo de unos días.

Hacer las necesidades requiere de una parafernalia especial. Para la micción se usa un tubo aspirador con un embudo en el extremo, personalizado y adaptado a la anatomía de cada astronauta. Para defecar, es necesario sujetarse al asiento del inodoro, equipado con barras de retención para garantizar un buen sellado entre el cuerpo y el inodoro. Una vez asegurada la posición, se acciona un potente ventilador que dirige una corriente de aire hacia un agujero de succión. Los residuos sólidos no se reciclan, sino que se almacenan para su eliminación en tierra.

Alimentarse en el espacio

Comer resulta más fácil, aunque los primeros días en ingravidez son todo un reto para el estómago. El llamado *mal del espacio* surge por un desacuerdo entre lo que se percibe con la vista y la sensación continua de caída que siente el sistema de equilibrio del oído. En tierra, los astronautas intentan aclimatarse previamente a esta situación viajando en aviones en vuelo parabólico, que simulan las condiciones de ingravidez, lo que facilita una rápida adaptación. Por lo general, un astronauta aprende a confiar en lo que ven los ojos y a reprogramarse, de manera que el mal del espacio desaparece al cabo de unos tres días.

En los días de los vuelos a la Luna, la comida procesada se almacenaba como pasta liofilizada, contenida en tubos de aluminio. En la actualidad, se cuenta con unas 200 recetas diferentes, con presentaciones muy similares a las que se pueden encontrar en cualquier restaurante. Las bebidas, sopas y otros platos de base líquida se sorben de recipientes herméticos mediante una cánula, mien-

tras que a la comida sólida se añaden aditivos para que tenga una textura pegajosa, por lo que es posible servirla en un plato y utilizar cubiertos, siempre con cuidado de evitar que algún fragmento se aleje flotando y acabe dañando algún dispositivo. Las comidas tienden a ser muy especiadas, debido a que la estancia prolongada en microgravedad reduce la sensibilidad de las papilas gustativas. La sofisticación del procesado de los alimentos para el espacio y la inversión necesaria para poner en órbita cualquier mercancía hacen que la entrega de 1 kg de alimentos tenga un coste medio de 20 000 €.

> Si no te gusta lo que se sirve en un avión, tendrás la misma impresión de la comida de la ISS. No volarías al espacio por la comida.
>
> CHRIS HADFIELD

Un gimnasio en órbita

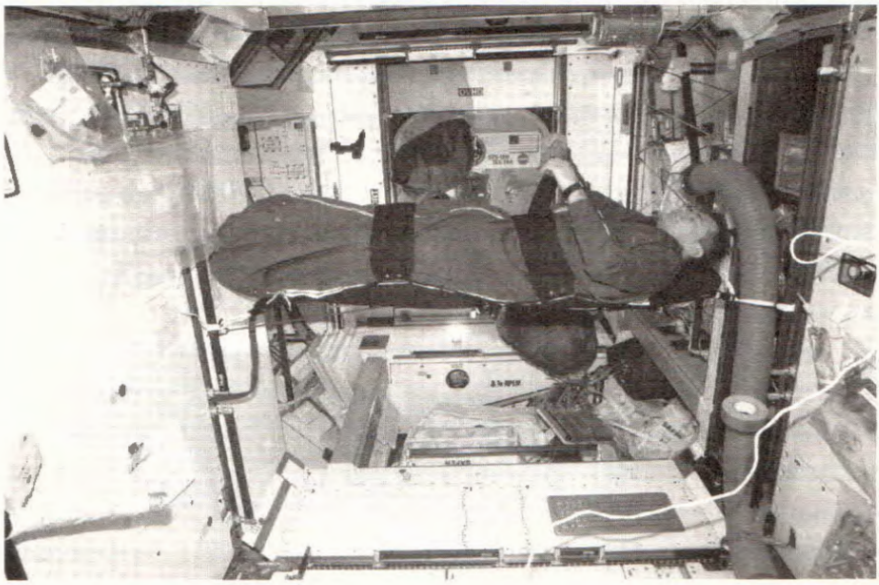
Una parte muy importante de la rutina diaria es hacer ejercicios, sobre todo cardiovasculares y de resistencia, para combatir los efectos de la ingravidez en el cuerpo. Con este fin, la Estación Espacial Internacional cuenta con una bicicleta estática, una cinta para correr a la que se enganchan los astronautas con unos amarres elásticos para simular el peso y ayudar a mantener al astronauta sobre la cinta, y desde 2008 un dispositivo multiejercicios, llamado ARED (*advanced resistive exercise device*), en el que pueden hacer flexiones, el equivalente al levantamiento de pesos, mediante extensores elásticos, estiramientos y otras actividades en condiciones parecidas a las de la gravedad. Los parámetros individuales de estos ejercicios se registran y se envían al control de la misión en la Tierra para su análisis, puesto que la salud de los tripulantes es un factor de importancia primordial para el éxito de cualquier misión en el espacio.

Descanso sin peso

La última tarea del día es ir a dormir. La mayor parte de astronautas optan por utilizar sacos de dormir enganchados a la pared, que evitan que el durmiente sea desplazado por las corrientes de aire que se generan en las rejillas de ventilación. Se ha observado que en ingravidez el cuerpo tiende, de forma natural, a adoptar una posición fetal. Dada la permanente sensación de caída que se siente en ingravidez, el sueño intranquilo es habitual, agravado por el continuo ruido de fondo del acondicionamiento de aire y del resto de sistemas que se han de mantener en funcionamiento constante. Por ello, muchos astronautas optan por el uso de tapones para los oídos y de máscaras para dormir, aunque la mayoría termina adaptándose al ruido, e incluso les parece tranquilizador el sonido que producen todos esos sistemas dedicados a mantenerlos con vida. Resulta especialmente importante que en el lugar elegido para dormir haya un flujo constante de aire, por ejemplo de un ventilador, para ayudar a que todo el dióxido de carbono que se espira durante la noche no se quede alrededor del astronauta: en la Tierra, el aire que expulsan de los pulmones está más caliente que el aire del entorno y asciende hacia el techo de la habitación, pero eso no ocurre en ingravidez, donde el aire expulsado tiende a permanecer formando una burbuja que rodea al astronauta, con el riesgo de hipoxia, es decir, de la disminución del oxígeno en sangre.

VESTIR EN EL ESPACIO

Cualquier ser vivo de la Tierra es el resultado de un largo proceso de evolución, que ha ido modulando sus características anatómicas y fisiológicas para responder a unas determinadas condiciones ambientales que pueden encontrarse en nuestro planeta, ya sea las bajas temperaturas de las regiones árticas, los desiertos de aridez



— Actividades cotidianas en la ingravidez de la Estación Espacial. Arriba, comida con alimentos procesados y frescos (izquierda) y ejercicio sobre cinta con anclajes (derecha). Abajo, astronauta en el interior de un saco de dormir, fijado a la estructura.

extrema o las profundidades abisales de los océanos. Así, todo animal o planta se mantiene con vida gracias a su capacidad para interactuar de forma eficiente con su entorno.

El mejor aliado del astronauta es el traje espacial, con el que consigue desenvolverse en el ambiente del espacio, completamente distinto a todos los de la Tierra: en el vacío no existe, por definición, nada material que pueda utilizarse para la supervivencia, y la falta de protección ante las bajas temperaturas, la radiación cósmica y solar, y la ausencia de presión es absoluta.

Los primeros prototipos

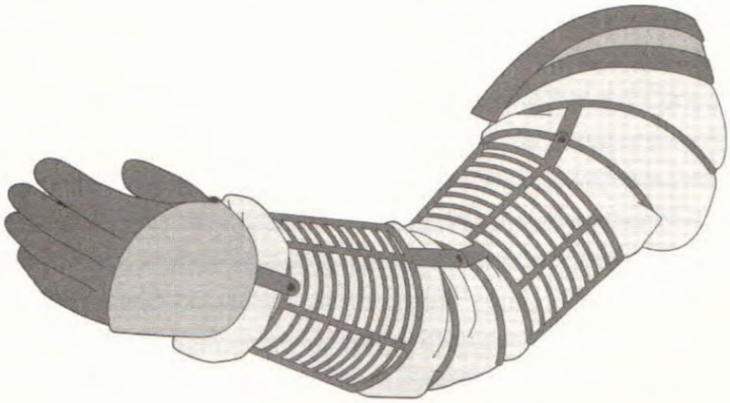
La historia del traje espacial comenzó mucho antes de que el ser humano se planteara volar al espacio. Las necesidades de enfrentarse a presiones atmosféricas bajas y rangos de temperatura muy bajos comenzaron con los primeros vuelos en globo que llegaron a la estratosfera. Esta capa de nuestra atmósfera, entre los 10 a 50 km de altura, tiene muchas de las características que se consideran propias del espacio: según la zona, las temperaturas rondan los –50 °C, la presión atmosférica va desde una décima de atmósfera en su límite inferior, hasta una milésima de atmósfera en su techo, y la radiación ambiente es mucho más elevada que a nivel del mar, al no contar con el escudo de una densa atmósfera.

Los primeros vuelos estratosféricos mostraron que uno de los principales problemas del traje presurizado era el de doblar las articulaciones: un traje con alta presión interior y muy baja exterior se hincha y se tensa, adquiriendo rigidez. Flexionar el codo se vuelve casi imposible, ya que al intentar doblar el tubo de la manga su volumen interno disminuye, lo que incrementa aún más la presión y ofrece una gran resistencia, que precisa de mucha fuerza para vencerla. Si la articulación se halla en una zona menos musculada, como los dedos de la mano, la flexión se hace agotadora y el trabajo

fino de manipulación resulta imposible. Es necesario un sistema de articulación que mantenga constante el volumen del traje.

La primera solución la dio otro navegante de la estratosfera, el español Emilio Herrera, que inventó un sistema de articulaciones rígidas en forma de acordeón flexible pero inextensible, capaz de doblarse sin cambiar su volumen interior. Este mecanismo es la base del sistema que se usa hoy día en la mayor parte de trajes: una serie de líneas rígidas inextensibles forman un armazón de alambres (fig. 1) que corren por el lateral de la articulación, de forma que la longitud total sea la misma tanto si se dobla como si no. Esto permite que el material en la zona interior de la articulación se comprima y colapse, perdiendo volumen, al tiempo que el material en la parte exterior de la articulación, que tiene un exceso intencionado de material, se expanda para mantener el volumen constante. Este sistema se puede combinar con otros, como las rótulas esféricas rígidas, que dan buenos resultados en trajes rígidos o semirrígidos.

Fig. 1



Esquema del armazón del sistema de articulación del traje diseñado por Emilio Herrera.

Cómo vestir en el vacío espacial

Otro de los retos que tuvo que superar el traje espacial fue el de mantener el cuerpo a una temperatura adecuada. En principio, con un buen sistema aislante que evite pérdidas de calor, bastaría añadir un sistema de calefacción dentro del traje. Pero las ascensiones en globo demostraron que el principal problema no era tanto mantener caliente el cuerpo como lo contrario: eliminar el calor sobrante, ya que el vacío (y la atmósfera de la estratosfera es tan tenue que a efectos prácticos es un vacío) es un excelente aislante térmico incluso aunque esté a muy bajas temperaturas, por lo que el calor que genera el cuerpo se acumula dentro del traje.

Sin la protección de una atmósfera que redistribuya el calor, en el espacio el astronauta se enfrenta a temperaturas extremas, que en las inmediaciones de la Tierra van de 100 a 120 °C cuando se recibe la luz del Sol, y que descienden a –150 °C en caso contrario. Esto quiere decir que el cambio de temperatura que sufre un astronauta, por ejemplo en el exterior de la Estación Espacial Internacional, cuando pasa de una zona en sombra a otra iluminada es extremo, y el traje espacial tiene que compensarlo. Para eliminar el exceso de calor, bajo el traje de presión lleva un traje LCVG (*liquid cooling and ventilation garment*), un vestido ajustado recubierto por una red de tuberías flexibles a través de la cual se bombea agua fría.

Los trajes espaciales más modernos constan de 14 capas, reunidas en tres sistemas. Las más exteriores son blancas o plateadas, a fin de reflejar tanto la radiación térmica como la ultravioleta, y proporcionan una protección muy limitada contra otras formas dañinas de radiación más energéticas, como los rayos gamma. Al mismo tiempo, son lo suficientemente resistentes para detener los impactos de micrometeoritos. Las capas interiores comprenden el sistema LCVG de refrigeración y los sensores para el control de las constantes fisiológicas del astronauta. En las capas intermedias se encuentran los sistemas de presurización, para mantener el cuer-

po a la presión atmosférica adecuada y evitar que escape el aire al espacio, puesto que otra de las funciones del traje espacial es suministrar aire respirable.

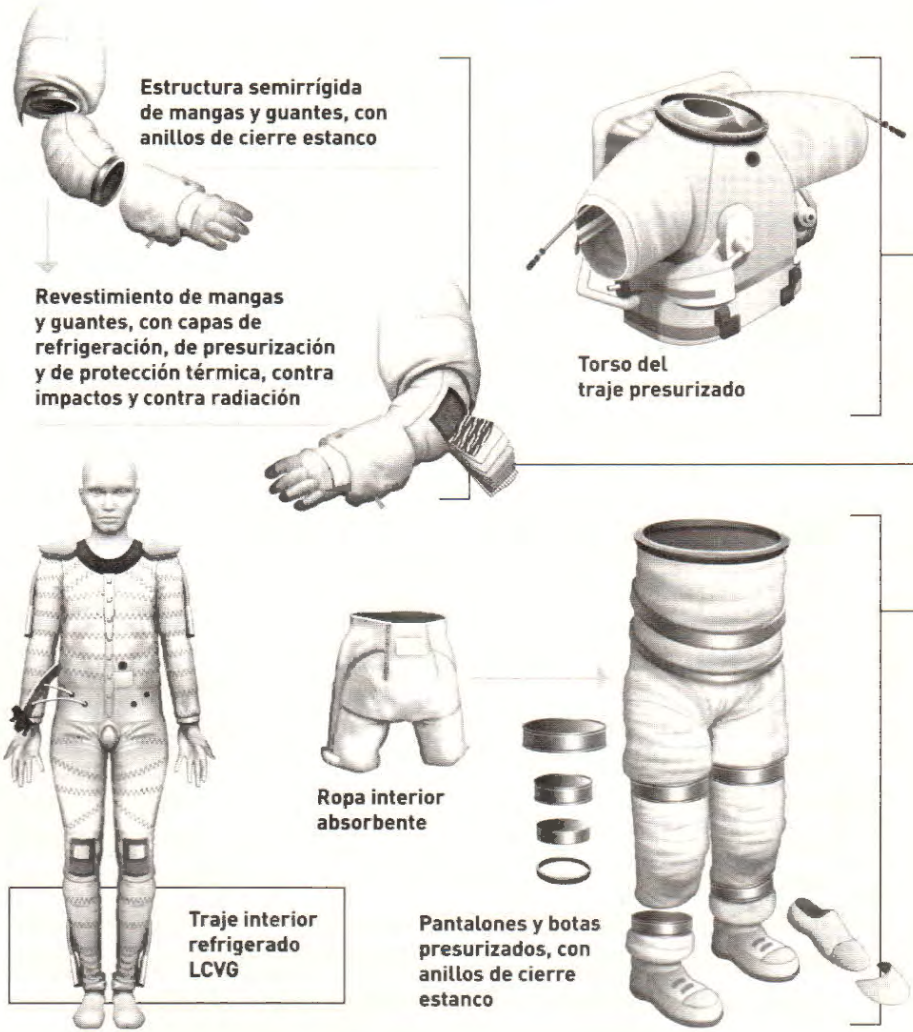
Los primeros trajes no tenían soporte de vida propio, sino que se conectaban a los sistemas de la nave con un cable a manera de cordón umbilical, al que se unían los suministros de aire y energía. Las versiones avanzadas para la actividad extravehicular poseen una mochila que incorpora el sistema de soporte de vida, que proporciona el oxígeno que los astronautas respiran cuando están en el exterior y elimina el dióxido de carbono que exhalan. La presión interior se mantiene baja, alrededor de las 0,3 atmósferas, más o menos la presión atmosférica de la cima del Everest, pero el aire que se introduce es prácticamente oxígeno puro, de manera que la presión parcial de oxígeno es equivalente a la del nivel del mar: de esta forma, se minimiza tanto el esfuerzo necesario para respirar como la fuerza para flexionar las articulaciones. A cambio, es necesario realizar en cámaras de descompresión una adaptación a la baja presión del traje antes de salir, y una nueva adaptación de vuelta a la presión normal.

La mochila también abastece de electricidad al traje. Un ventilador hace que el oxígeno circule por su interior y un refrigerador enfría el agua del sistema de control de la temperatura. También sujeto a la espalda del traje, el dispositivo SAFER (por las siglas en inglés de la denominación «auxilio simplificado para rescate en actividades») está preparado para actuar como unidad de emergencia en condiciones de ingravidez. Cuenta con varios pequeños inyectores de propulsión, que pueden devolver a la nave al astronauta que se separe de forma accidental.

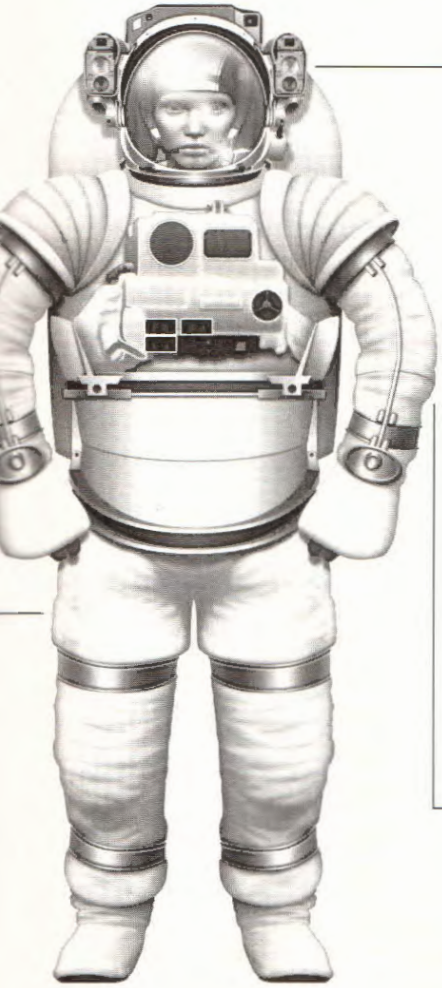
Por último, el casco cuenta con un visor protector, recubierto de material reflectante, que se puede bajar para filtrar la mayor parte de la radiación solar directa. Bajo el casco, directamente sobre la cabeza, va situado el *snoopy*, un gorro con los auriculares receptores y el micrófono del sistema de radio.

> EL TRAJE ESPACIAL

El traje espacial es un conjunto formado por elementos de alta tecnología, que proporcionan al astronauta las condiciones necesarias para la supervivencia y el trabajo en el vacío espacial o en una atmósfera extra-



terrestre. Los distintos componentes se integran en sistemas y capas con funciones específicas, que comprenden desde el soporte vital hasta las comunicaciones y el suministro de energía.

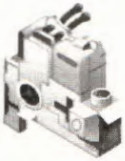


Traje espacial completo

Casco exterior con sistemas de cámaras e iluminación

Casco interior presurizado

Casquete *Snoopy* con auriculares y micrófono para comunicación



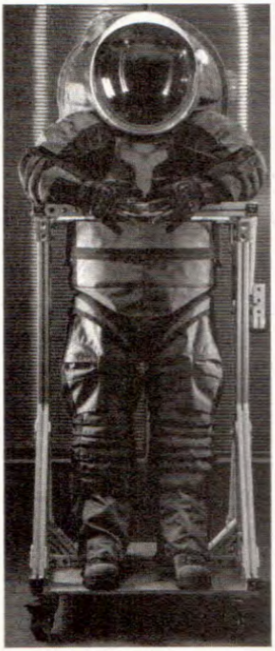
Placa pectoral con los controles principales del traje

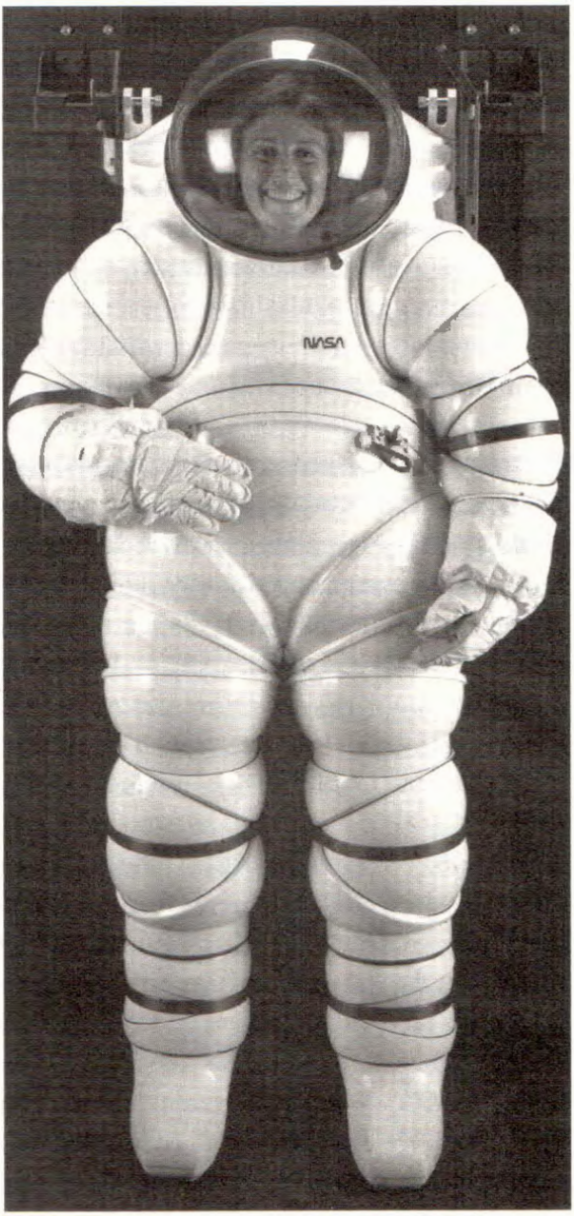
Mochila del sistema primario de soporte vital (oxígeno, baterías, radio, refrigerante)

La moda espacial que viene

El diseño básico del traje espacial no ha sufrido cambios radicales y, salvo pequeñas variaciones (por ejemplo, las botas para las misiones *Apollo* que aterrizaron en la Luna), es bastante similar en las versiones de todas las agencias espaciales. Sin embargo, están sobre la mesa de diseño diferentes proyectos que pretenden modificar a fondo la imagen que tenemos del traje espacial. Una de las posibilidades que se está volviendo a considerar se basa en un traje rígido como el AX-5 de la década de 1980, con articulaciones de rótula, a presión de una atmósfera: se trataría, de algún modo, de una pequeña nave espacial individual. La gran ventaja de un traje así es que no sería necesario pasar por los procesos de descompresión para ponérselo, resistiría mejor los impactos y podría incorporar con facilidad una capa extra de blindaje contra la radiación, muy conveniente para exposiciones prolongadas en el exterior. Las articulaciones rígidas harían mucho más fácil cambiar la posición corporal sin esfuerzo, con una gran libertad de movimientos del ocupante, casi la misma que si no llevara traje. Por el contrario, sería muy pesado, por lo que necesitaría de sistemas de ampliación muscular, convirtiendo el traje en un exosqueleto mecánico, que no funcionaría sin un importante consumo de energía. Las articulaciones rígidas, por su parte, deberían diseñarse de manera que no se vieran afectadas por partículas que podrían bloquearlas, como el polvo lunar.

Otra línea de investigación, desarrollada en paralelo, parte de un concepto distinto: mientras que en el interior de los trajes espaciales en uso se mantiene una determinada presión del aire que evita los efectos de la descompresión, en esta alternativa se aprovecha la resistencia de una capa de tejido muy resistente y ajustado, ligeramente elástico y flexible, que se ajustaría al cuerpo ceñido como un guante, salvo en la cabeza, que llevaría un casco escafandra. Al no contener aire en su interior, se elimina el problema de la dificultad de la flexión de las articulaciones. El enfoque de este tipo de traje de





— Prototipos de trajes espaciales. Izquierda, BioSuit (arriba) de tejido compresor flexible y Z-2 (abajo), para uso en una superficie planetaria. A la derecha, AX-5, de diseño rígido con articulaciones tipo rótula.

contrapresión mecánica ya se consideró en los inicios de la carrera espacial, pero fue descartado al no contarse con los materiales avanzados que pudieran ejercer la fuerza necesaria sobre el cuerpo. Su desarrollo se reemprendió en 2007, con un primer prototipo, llamado BioSuit, preparado para el equivalente de un tercio de atmósfera. Un equipo similar, el Z-2, podría ser usado en la primera expedición humana a la superficie de Marte.

INGRAVIDEZ Y SALUD

Para muchos astronautas, el primer efecto de la falta de peso es el ya mencionado mal del espacio, que puede producir un cuadro en el que se incluyen náuseas, pérdida del apetito, jaquecas y somnolencia. En general, la permanencia a largo plazo en ingravidez tiene efectos negativos en el organismo, muy similares a los que produce una convalecencia prolongada en cama, aunque más acusados.

El trabajo de mantener huesos y músculos

Cuando los huesos y músculos no están haciendo el trabajo de luchar contra la gravedad, se deterioran con rapidez. Los huesos pierden densidad y los músculos, entre ellos el corazón, corren el riesgo de atrofiarse. Esto no solo afecta al rendimiento en el espacio, sino que puede ser un serio problema de salud al volver a la Tierra, produciendo insuficiencia cardíaca o fracturas óseas. En condiciones normales, el hueso viejo se descompone por la acción de los osteoclastos, un tipo de células especializadas que liberan el calcio al torrente sanguíneo, y se reemplaza con hueso nuevo, gracias a los osteoblastos, células que fijan nuevo mineral a lo largo de la superficie del hueso. En un individuo sano en la Tierra, el hueso se forma a la misma velocidad a la que se deshace, por lo que no hay una pérdida total de masa ósea.

En falta de gravedad este equilibrio se rompe: el ritmo al que se degrada el esqueleto es mayor que el de formación, y cada vez más calcio acaba en el torrente sanguíneo del astronauta. Esto, además de causar un debilitamiento del hueso, favorece la formación de cálculos renales de carbonato cálcico. La osteoporosis por desuso es todavía un misterio médico: el mecanismo exacto que causa la pérdida de calcio en microgravedad es desconocido. Las líneas abiertas de investigación sobre cómo paliarla incluyen tratamientos hormonales, dieta y ejercicio. Es sin duda uno de los principales problemas que tienen que enfrentar los astronautas, y aunque el ejercicio continuado ayuda a controlar hasta cierto punto este problema, no es suficiente. Es necesario complementar el ejercicio con medicación, como los bisfosfonatos, que contribuyen a la fijación de calcio en los huesos.

La pérdida de masa muscular también supone un serio problema, pues perdura aunque se siga un estricto régimen de ejercicio, que la ralentiza pero no la detiene. En la estación espacial *Mir*, puesta en órbita por la Unión Soviética, se observó cómo los gemelos de las piernas sufrían una disminución en el rendimiento del 35 % al cabo de 180 días. En la Estación Espacial Internacional, en la que se sigue un programa de trabajo físico más exigente, la pérdida es solo del 25 % para el mismo período. Son valores más reducidos que el 40 % que sufren los pacientes encamados en reposo absoluto durante el mismo tiempo, aunque no son suficientes. Para paliarlos en mayor medida, se ha propuesto que los cosmonautas vistan prendas con pesos distribuidos por toda su extensión, para que los músculos trabajen contra la inercia en cualquier movimiento, y realicen así un ejercicio adicional.

Cambios en el medio interno

La falta de peso hace también que los tejidos y órganos blandos se hinchen. Es algo a lo que se enfrentan los astronautas tras un par

de semanas en microgravedad. La razón es que la gravedad ya no está empujando de continuo los fluidos corporales (por ejemplo, la sangre y la linfa) hacia la parte inferior del cuerpo, por lo que se redistribuyen de manera más uniforme, con lo que llega un aporte mayor que el habitual a la mitad superior del cuerpo, y menor a la mitad inferior. El corazón se vuelve menos eficiente, quedando algo de sangre en su interior tras cada contracción. Además, dado que los grandes grupos musculados de la mitad inferior como las piernas no requieren tanta sangre al no realizar casi esfuerzo, se produce un estrechamiento de sus vasos sanguíneos. Conforme la duración de la exposición a la ingravidez se prolonga, estos cambios se acentúan y pueden incluso cambiar de forma permanente el funcionamiento del sistema circulatorio e incrementar el riesgo de dolencias cardiovasculares.

Por otro lado, al llegar más sangre a la parte superior del cuerpo, la presión intracraneal también se incrementa. Como consecuencia, el líquido que rodea el cerebro aumenta de volumen, presiona contra el nervio óptico y desciende a lo largo de su canal, deformando el globo ocular que adquiere un cierto grado de miopía, al cambiar su distancia focal. Se ha demostrado que tras estancias de varios meses en el espacio, un porcentaje en torno al 80 % de astronautas desarrolla una miopía permanente.

Nadie quiere perder peso en el espacio

La solución a todos los problemas fisiológicos anteriores pasa, a largo plazo, por proveer a las estaciones y naves espaciales de algún tipo de gravedad. La fórmula tecnológica más sencilla es la incorporación de zonas giratorias, que ejercerían una fuerza centrífuga constante, equivalente a la gravedad. Las naves de los relatos y películas de ciencia ficción optan con frecuencia por este sistema, que fue tomado en cuenta y ampliado por Konstantín Tsiolkovski en

> UNA CAÍDA SIN FINAL

Una de las imágenes más comunes de las misiones espaciales es la de los astronautas flotando en el interior de la nave. El término *ingravidez* se suele interpretar erróneamente como ausencia de gravedad, cuando lo correcto sería describirlo como carencia de peso: un objeto en ingravidez no marca peso sobre una báscula, pero sigue bajo la acción gravitatoria de la Tierra. Está literalmente cayendo, pero su trayectoria sigue la curvatura del planeta y nunca encuentra el suelo. La experiencia de un astronauta es la misma que se experimenta en un avión en caída libre: mientras desciende, todos los objetos parecen flotar en su interior, aunque observados desde el exterior se vea que se precipitan hacia el suelo. Para un astronauta en órbita este efecto es constante y sus repercusiones sobre el organismo poco tienen que ver con la placidez de una verdadera flotación.

— Astronautas experimentando condiciones de microgravedad en el interior de un reactor KC-135 de la NASA en caída libre parabólica.

uno de sus proyectos, consistente en una estación espacial cilíndrica, cuyo giro alrededor del eje longitudinal dotaría de gravedad a la superficie curva interior.

El principal problema es que, para que sea eficaz, una sección centrifugadora debería ser muy grande o girar muy deprisa. En 1966, durante el vuelo de la cápsula *Gemini 11*, se la unió con un cable de 36 m a un módulo Agena y se las hizo girar una alrededor de la otra completando una rotación cada 140 s; la gravedad que se generó fue de apenas una diezmilésima de la gravedad terrestre, prácticamente indetectable para los astronautas que estaban en el interior. Para alcanzar una gravedad como la terrestre, el módulo debería haber girado 80 veces más deprisa. La velocidad angular necesaria se reduce a medida que aumenta el diámetro del dispositivo giratorio: un módulo de 25 m de diámetro generaría una fuerza centrífuga equivalente a una cuarta parte de la gravedad terrestre con un ritmo de una vuelta cada 20 s. De hecho, una centrifugadora introduciría un problema adicional: acabaría haciendo girar en sentido contrario toda la nave o estación en la que estuviera instalada. La solución sería disponer de al menos dos, que giraran a la misma velocidad pero en sentidos opuestos, para que equilibraran sus efectos, anulándolos.

Otra solución al problema de la gravitación, aplicable solo durante los vuelos espaciales pero no en órbitas estables, es el mantenimiento sostenido de una aceleración. Se trata del mismo fenómeno que se experimenta en un vehículo que incrementa su velocidad, produciendo un fuerza con sentido contrario al de la marcha, que desaparece en cuanto el vehículo pasa a desarrollar una velocidad constante. Este empuje puede hacer también las funciones de una gravedad artificial, pero para que funcione en todo momento, la nave debe incrementar su velocidad sin pausa, lo que supone un gasto energético enorme, sobre todo si se compara con la facilidad con la que genera peso una centrifugadora. Por último, hay que tener en cuenta que, en caso de encontrarse sobre la superficie de un planeta o satélite, la gravedad natural, aunque sea tan reducida

como la de la Luna, es una gran ayuda que mitiga notablemente los efectos negativos de la ingravidez prolongada.

Con todo, hay una situación sobre la que no se tiene ninguna experiencia y que en el futuro sin duda será preciso tener en cuenta: se trata de nacer y crecer en otros mundos. ¿Hasta qué punto puede afectar una gravedad más baja al desarrollo y crecimiento de un ser humano? Apenas se dispone de datos experimentales que se puedan relacionar de forma directa con la evolución de un embarazo y un parto en condiciones distintas de las de la Tierra, como una gravedad mayor o menor, o niveles más altos de radiación. Una vez se encuentren sistemas para asegurar la natalidad, imprescindible para asegurar la continuidad de una colonia fuera de nuestro planeta, se cree que es muy posible que un niño criado en Marte o en la Luna alcanzara una altura mayor que la que hubiera tenido de nacer en la Tierra, ya que parte del crecimiento espinal depende de la intensidad de la gravedad, y que sus huesos fueran más finos y su musculatura menos desarrollada.

> La microgravedad fuerza cambios en nosotros como seres humanos.
>
> LINDA M. GODWIN

PROTEGERSE DE LO INVISIBLE

El mayor peligro de un vuelo interplanetario prolongado, como el trayecto entre la Tierra y Marte, sería la radiación acumulada a la que se verían expuestos los viajeros. La Tierra recibe un bombardeo constante de radiación, en forma de rayos cósmicos, rayos ultravioletas provenientes del Sol, así como esporádicas tormentas solares, que generan intensos chorros de protones de alta energía. Todas estas variedades de radiaciones ionizantes son fuentes de daño celular, que pueden desembocar en un amplio espectro de dolencias. Sin embargo, la superficie de nuestro planeta queda protegida por

el potente campo magnético generado en el núcleo y por el filtro que suponen las diferentes capas de la atmósfera, que desvían o frenan la mayor parte de esta radiación.

La Estación Espacial Internacional, aunque queda fuera de la parte más densa de nuestra atmósfera, todavía está protegida por el campo magnético de la Tierra. Aun así, la dosis diaria de radiación (fig. 2) que reciben los astronautas durante su estancia es más de cincuenta veces superior a la que llega al nivel del mar. En cuanto se supera la protección de los llamados *cinturones de Van Allen*, generados por la magnetosfera, la dosis aumenta hasta casi 250 veces respecto a la normal en la Tierra, lo que equivaldría a hacerse una radiografía al día. En Marte, la cosa mejora un poco, porque su tenue atmósfera proporciona algo de protección, pero el nivel de radiación es todavía unas 100 veces la terrestre. En el gráfico de barras de la figura 2 se representan las dosis de radiación absorbidas en diferentes situaciones.

Así, se hace imprescindible algún tipo de blindaje. Resulta relativamente fácil parar buena parte de esta radiación, sobre todo la ultravioleta y el viento solar de partículas. Los rayos cósmicos, por su parte, son mucho más penetrantes: una plancha de aluminio de 30 cm de grosor apenas consigue detenerlos. La solución sería usar materiales más densos y de mayor espesor, como las gruesas planchas de plomo con las que se blindan los isótopos en los laboratorios nucleares, pero esto implicaría mucha más masa y por tanto más gasto de combustible para moverla. Además, un blindaje tal podría ser incluso más peligroso que la exposición directa a la radiación, pues al frenar un rayo cósmico de alta energía podría provocarse la colisión con otras partículas y crear una radiación secundaria peligrosa, como neutrones energéticos.

Un enfoque alternativo prometedor consiste en replicar el campo magnético de la Tierra, para desviar las partículas cargadas. Un campo magnético localizado y con la suficiente intensidad podría crear una burbuja protectora alrededor de la zona habitada. Pero la

Fig. 2

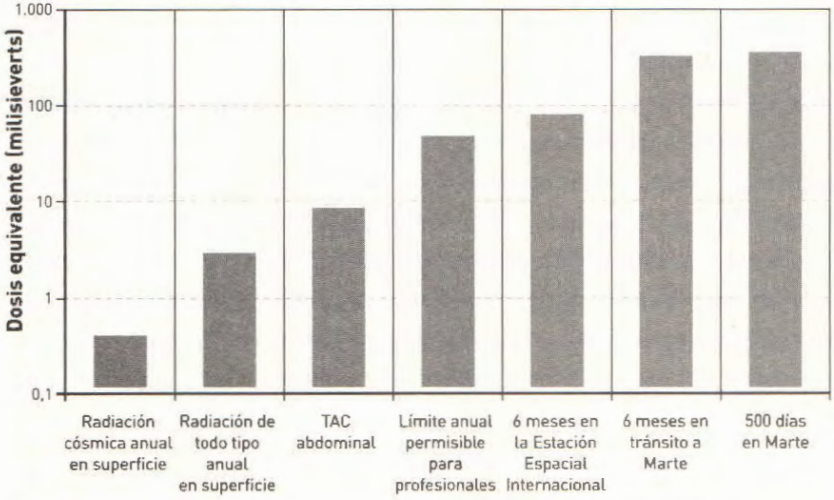


Gráfico de barras con algunas estimaciones de dosis de radiación absorbidas en diferentes situaciones. Hay que tener en cuenta que la escala del eje vertical es logarítmica, con incrementos mayores cuanto más se asciende por él.

cantidad de energía que se necesitaría para mantener este sistema hace que, de momento, sea solo una solución a largo plazo.

A medio plazo, la respuesta parece estar no en buscar materiales densos, sino en todo lo contrario. Si se tiene en cuenta que el 95% de los rayos cósmicos son protones de alta energía, con una masa casi idéntica a la de un átomo de hidrógeno, y que la forma más eficiente de detener una partícula es que choque con algo de su mismo tamaño, lo que impide múltiples choques secundarios, sería de esperar que un muro de hidrógeno se pudiera emplear como un escudo eficiente. ¿Cómo se crearía esta barrera? La forma más sencilla sería disponer grandes depósitos de agua alrededor de los habitáculos, ya que, además de incluir dos átomos de hidrógeno por molécula, el agua se aprovecharía para el abastecimiento de los astronautas. También se consideran nuevos materiales que in-

cluyen abundante hidrógeno en su estructura, como el polietileno, un plástico barato de producir, o los nanotubos de nitruro de boro hidrogenados (BNNT-h), pequeños tubos de carbono, boro y nitrógeno, con hidrógeno intercalado en los espacios vacíos que quedan entre los tubos (el boro es también un excelente absorbente de los neutrones secundarios que puede producir la radiación cósmica). Los nanotubos, que son un material fuerte y resistente a las altas temperaturas, podrían utilizarse para fabricar estructuras protectoras en una nave, así como para obtener filamentos con los que confeccionar los trajes de los astronautas.

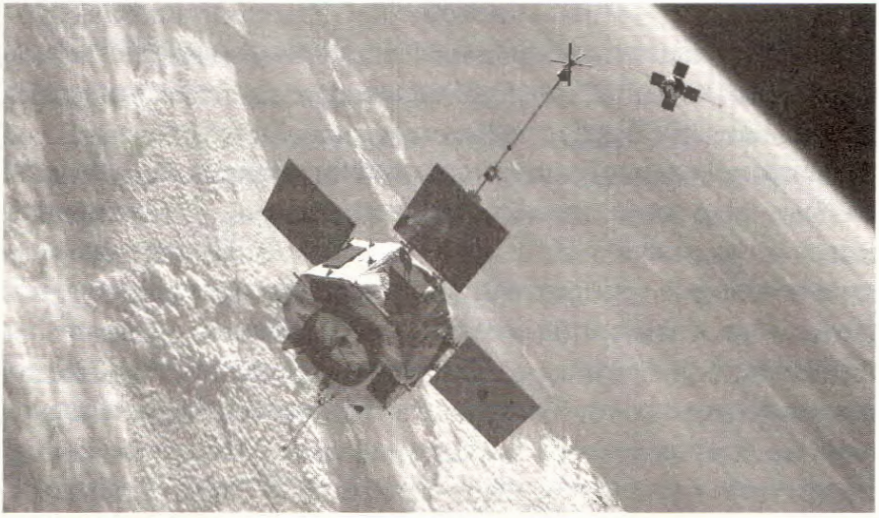
MÁS ALLÁ DE LA FISIOLOGÍA

Están bien estudiados los efectos sobre la fisiología y la anatomía que producen las condiciones a las que se someten los astronautas en el espacio, así como las medidas que se pueden adoptar para minimizarlos, de manera que los vuelos de larga duración sean un reto superable. Para completar este examen, hay que tener en cuenta también lo que puede suponer para el ser humano la larga convivencia en un entorno cerrado y en un ambiente artificial y aislado. ¿Es la salud mental el cuello de botella de la colonización espacial?

Uno de los primeros intentos de establecer habitáculos cerrados que acogiesen seres humanos durante largos períodos de tiempo, bajo condiciones similares a las de una base espacial, fue el experimento soviético BIOS-3, que inició su funcionamiento en 1972. Consistía en un laboratorio de 315 m^3 que simulaba un ecosistema cerrado, y en el que equipos de tres voluntarios realizaban estancias durante períodos de hasta 6 meses. El proyecto experimentó con éxito los sistemas de reciclado de aguas y generación de oxígeno mediante algas. Se trataba de un sistema parcialmente autónomo, ya que almacenaba los desechos sin reciclarlos, y contaba con un almacén de alimentos al iniciarse cada estancia, complementados

> CHISPAS EN LOS OJOS

Desde los primeros vuelos espaciales, los astronautas han reportado haber visto destellos en el espacio, incluso con los ojos cerrados. En un informe de las misiones *Apollo*, los astronautas clasificaron en tres tipos los destellos que vieron: en punto, en raya y en nube. Estaban viendo rayos cósmicos, que cuando inciden en las células de la retina ceden parte de su energía, excitando la célula que transmite esta información al cerebro y que este interpreta como luz. Cuando el rayo cósmico incide tangencialmente, el recorrido es más largo y la traza se percibe como una raya, mientras que si incide perpendicularmente, se percibe como un punto de luz. Solo los rayos cósmicos más energéticos son capaces de excitar más de una célula de la retina, a veces provocando una cascada de partículas, lo que se percibe como una estructura difusa. Los rayos cósmicos son más abundantes fuera de la protección de los cinturones de Van Allen, por lo que afectaron más a los astronautas de las misiones *Apollo*, que los sobrepasaron.



— Los dos satélites del proyecto Van Allen Probes, puestos en órbita alrededor de la Tierra en 2012, para el análisis del escudo creado por la magnetosfera planetaria.

con hortalizas cultivadas en el propio laboratorio. No surgieron especiales problemas de convivencia durante estos períodos semestrales, y mucho de lo que se aprendió en BIOS-3 tuvo aplicación posterior en la estación espacial *Mir*.

La respuesta americana fue el experimento Biosfera 2, que pretendía recrear las condiciones de una gran base espacial. Contaba con una hectárea herméticamente cerrada de jardines, huertos, selvas, sabanas y hasta un lago con arrecifes de coral, donde vivieron durante dos años ocho personas. Las cosechas obtenidas constituyeron un pobre suministro, que según se denunció tuvo que ser mejorado con suministros del exterior que habrían falseado los requisitos de aislamiento previstos. Las duras condiciones propiciaron enfrentamientos entre los participantes, que a la larga fueron el principal factor que llevó a interrumpir el ensayo.

Si algo demostró Biosfera 2 fue que quizás el eslabón más débil para establecer una base en otro mundo sea la convivencia, como también lo ha demostrado la experiencia acumulada durante décadas en las bases en la Antártida. Por tanto, a la hora de elegir al personal resulta indispensable establecer buenos perfiles psicológicos, por lo que los experimentos posteriores de aislamiento prolongado han hecho más hincapié en las relaciones humanas que en la autosostenibilidad.

Este fue el caso de Mars500, un experimento de la Academia de Ciencias Rusa con la colaboración de la ESA, que recreó todas las etapas de un posible viaje a Marte. Mars500 no era autocontenido en lo referente al suministro de aire y energía, pues su objetivo era prevenir los problemas de convivencia que pudieran surgir. En las instalaciones de Mars500, 6 voluntarios elegidos entre 6 000 candidatos vivieron en condiciones de aislamiento análogas a las que tendrían si estuvieran en una nave espacial. Toda comunicación fue por radio y cuanto más «lejos» estaban de la Tierra, el retraso de las comunicaciones era mayor. La misión, que «despegó» en junio de 2010 y «volvió» de Marte en noviembre de 2011, no tuvo serios

problemas de convivencia (o al menos no transcendieron), aunque el hecho de que fuera una tripulación solo masculina suscitó numerosas críticas. Pese a que su utilidad es indudable, a Mars500 se la tildó de poco realista en algunos aspectos: una misión real tendría que enfrentar el problema de la ingravidez y la amenaza de la radiación, riesgos para la salud que pueden pasar factura a la buena convivencia. Además, los voluntarios también sabían que si algo iba realmente mal podían parar el ensayo en cualquier momento, lo que representa una diferencia psicológica importante.

LISTOS PARA EL SALTO

La colonización humana del sistema solar es un proyecto que se apoya en dos pilares: la tecnología necesaria para salir de la Tierra y navegar por el espacio, y el dominio de los sistemas de soporte vital, que aseguren no solo la supervivencia de los astronautas, sino también su capacidad para emprender cualquiera de las tareas que comportará el proceso de expansión de la humanidad. Una vez resueltos estos retos, estaremos listos para el salto. Es el momento de plantear una nueva pregunta: ¿hacia dónde dirigirse? Para responder, hace falta examinar los planetas y satélites de nuestro sistema solar y qué estrategias pueden ser las que tengan mayores probabilidades de éxito para colonizar cada uno de ellos.

04 LA COLONIZACIÓN DEL SISTEMA SOLAR

La expansión de la humanidad por el sistema solar será una empresa compleja, que necesitará desarrollar estrategias para establecerse en los planetas rocosos, en los océanos ocultos bajo las superficies de algunos satélites, en las atmósferas de los gigantes gaseosos o en órbita en el espacio. Las propuestas que se barajan combinan rigor e imaginación.

La colonización del sistema solar requerirá la adaptación del ser humano a una serie de ambientes muy diferentes del de la Tierra, o la modificación de estos a las necesidades de los colonizadores. La humanidad deberá encarar nuevos retos, algunos de los cuales ya se están afrontando en las estaciones espaciales, aprovechando la seguridad que proporciona la proximidad al planeta madre, del que los tripulantes pueden obtener apoyo en caso necesario. El suministro de aire y agua, el reciclado de los desechos, la generación de alimentos, la instalación de blindajes protectores, así como los riesgos del aislamiento y del estrés, son algunos de los principales factores que se deberán resolver para establecer colonias permanentes fuera de nuestro planeta, que tendrán que ser autosuficientes en todos los aspectos antes de poder ser valoradas como un éxito. Aunque los riesgos son importantes, los beneficios que supondrá establecer una civilización interplanetaria hacen que merezca la pena afrontar el desafío. Establecer una civilización interplanetaria es un reto tecnológico y científico que el ser humano pronto estará en disposición de afrontar. Los desafíos de la nueva frontera

serán un poderoso estímulo para la investigación, actuando como catalizador de una nueva era de progreso.

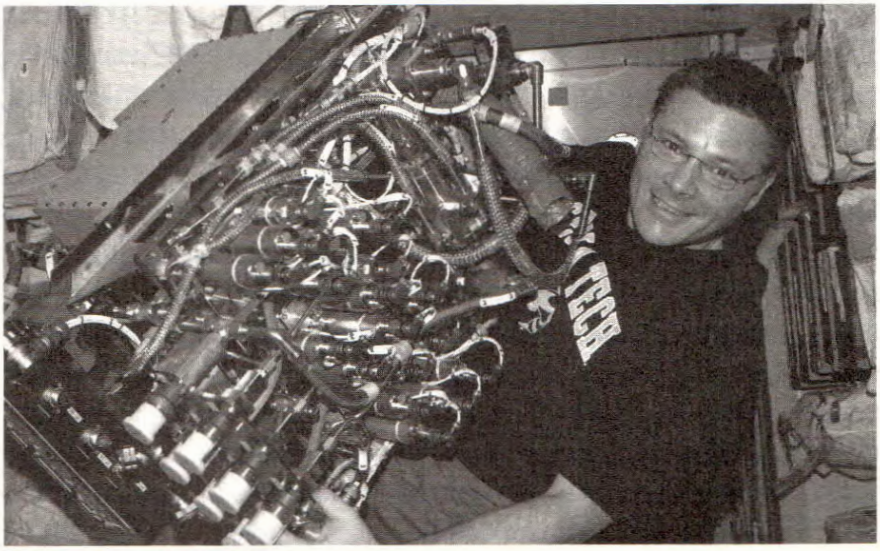
ECOLOGÍA PARA EL ESPACIO

Un ecosistema cerrado es una comunidad de organismos que no necesita intercambiar materiales con el exterior del sistema para subsistir: no es necesario aportarle alimentos ni tampoco retirar sus desechos, que el propio sistema recicla. Lo único del exterior que precisa para funcionar es un aporte de energía, usualmente en forma de radiación solar. El interés de los ecosistemas cerrados para la exploración espacial es obvio: si se consigue que una estación o una colonia planetaria (incluso una nave, teniendo en cuenta que los viajes interplanetarios serán largos) sea un ecosistema cerrado, la supervivencia de los colonos no dependerá de los envíos a coste muy elevado de oxígeno, alimentos y agua. La Estación Espacial Internacional, por ejemplo, solo recicla parte de sus aguas residuales, y es necesario abastecer a sus moradores con cargamentos de agua desde la Tierra. Dado los costes de lanzamiento, se calcula que los suministros necesarios para su mantenimiento ascienden a unos 2000 millones de euros anuales. Pero ¿son factibles los ecosistemas artificiales cerrados?

Uno de los requisitos para tener un ecosistema cerrado funcional es que incluya al menos un organismo autótrofo, esto es, que sea capaz de sintetizar las moléculas necesarias para su funcionamiento a partir de sustancias inorgánicas y una fuente de energía, como hacen las plantas. De hecho, es posible tener un ecosistema cerrado funcional de pequeño tamaño compuesto solo de plantas, como lo demuestran los jardines embotellados: con la tierra del sustrato, el agua atrapada dentro de la botella herméticamente cerrada y el aire en el interior de la misma, la planta tiene todo lo que necesita para vivir durante un largo período de tiempo, siem-

> UNA FUENTE ARTIFICIAL

La reacción de Sabatier obtiene agua y metano a partir de hidrógeno molecular y del dióxido de carbono producido por la respiración, según la fórmula $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$. Requiere altas presiones y una fuente de energía, pero permite eliminar el dióxido de carbono del aire, proporcionando algo tan útil como el agua. Con un nuevo aporte de energía, parte de esta agua se puede disociar mediante electrolisis, obteniendo así oxígeno respirable e hidrógeno, que se puede volver a reutilizar en la reacción de Sabatier, dando lugar a un ciclo casi cerrado. Queda el metano como único residuo no aprovechable. Este sistema funciona en la Estación Espacial Internacional desde 2010 y ha logrado disminuir notablemente la necesidad de recibir cargamentos de agua desde la Tierra. En cuanto al metano, en la actualidad la estación espacial lo descarta y lo expulsa al espacio, aunque es posible que en el futuro se emplee como materia prima en algún otro proceso.



— Reactor Sabatier durante su instalación en la Estación Espacial Internacional.

pre que reciba luz suficiente. El agua que absorbe por las raíces se evapora luego a través de las hojas; y de día genera el oxígeno que consume de noche. De manera similar, el carbono absorbido del CO_2 atmosférico se devuelve al descomponerse las hojas muertas. Por supuesto, conforme la planta crezca, parte del carbono y del agua se irán incorporando a los nuevos tejidos y desaparecerá del entorno, y llegado un momento será necesario reponerlos. Pero estos sistemas pueden mantenerse durante mucho tiempo, como lo demuestra el jardín que embotelló el británico David Latimer en 1960, que solo necesitó ser regado en una ocasión, en 1972, y aún sigue vivo.

En cuanto a ecosistemas cerrados con animales, los primeros estudios científicos los desarrolló en la década de 1960 el microbiólogo estadounidense Clair Folsome. Basándose en sus trabajos, dos décadas después, Joe Hanson, biólogo del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, descubrió que pequeñas comunidades de bacterias, algas, gorgonias y camarones pueden mantenerse en un entorno cerrado, en equilibrio ecológico, sin necesidad de aportar nutrientes desde el exterior, siempre que reciban luz del sol. Hoy día estas ecosferas se comercializan a modo de peceras sin mantenimiento, y su duración es de unos dos años, la vida media de los camarones, pues raras veces se reproducen en este entorno, aunque la comunidad de bacterias y algas persista durante bastante más tiempo.

Los resultados que se obtienen en estos diminutos ecosistemas cerrados indican la factibilidad de entornos artificiales automantenidos, capaces de soportar la vida humana, y se puede considerar que la Tierra es, en sí misma, un ecosistema cerrado de inmenso tamaño. Así pues, si es posible encontrar ecosistemas de tamaño planetario o en el interior de un frasco, parece lógico que también sean factibles los de cualquier tamaño intermedio.

Los ecosistemas cerrados extremos se diferencian en su diversidad biológica: las ecosferas tienen una complejidad biológica

muy limitada, mientras que la de la Tierra es inmensa; tal vez, a mayor tamaño sea necesaria mayor diversidad para mantener el sistema en equilibrio. El experimento Biosfera 2, que intentó ser un ecosistema cerrado de gran tamaño, permitió detectar algunos intrigantes problemas que habrá que tener en cuenta en futuros experimentos, como la constante e inexplicable caída del nivel de oxígeno, al parecer producida por un exceso de bacterias en el sustrato, y la muerte de los insectos polinizadores. Uno de los resultados más interesantes de este proyecto fue la constatación de que estos ecosistemas artificiales tienden a perder la biodiversidad.

LOS PRIMEROS PASOS

Las estaciones espaciales, como se ha visto en capítulos anteriores, son grandes habitáculos situados en el espacio, capaces de mantener con vida a los astronautas durante períodos prolongados. Son lugares ideales para hacer ciencia en condiciones imposibles de encontrar en la Tierra y los mejores laboratorios para analizar las respuestas del cuerpo humano en el espacio. Las estaciones espaciales mayores y más longevas han sido la *Mir* soviética, con un volumen habitable de 350 m^3 y que se mantuvo activa desde 1986 hasta 2000, y la Estación Espacial Internacional, en funcionamiento desde 1998 y con un volumen habitable de 837 m^3. Sin embargo, hasta el momento ninguna de estas infraestructuras puede recibir el nombre de colonia orbital, tanto por su tamaño como por su dependencia casi absoluta del abastecimiento desde tierra.

Las estaciones espaciales han trabajado en la parte baja de las órbitas LEO, entre 200 y 500 km de altura, donde la densidad de la atmósfera es aún lo bastante elevada para producir un rozamiento que poco a poco las frena, de manera que necesitan impulsos esporádicos para evitar su caída. Una órbita LEO más elevada, cercana a los 1000 km de altitud, sería un emplazamiento más adecuado

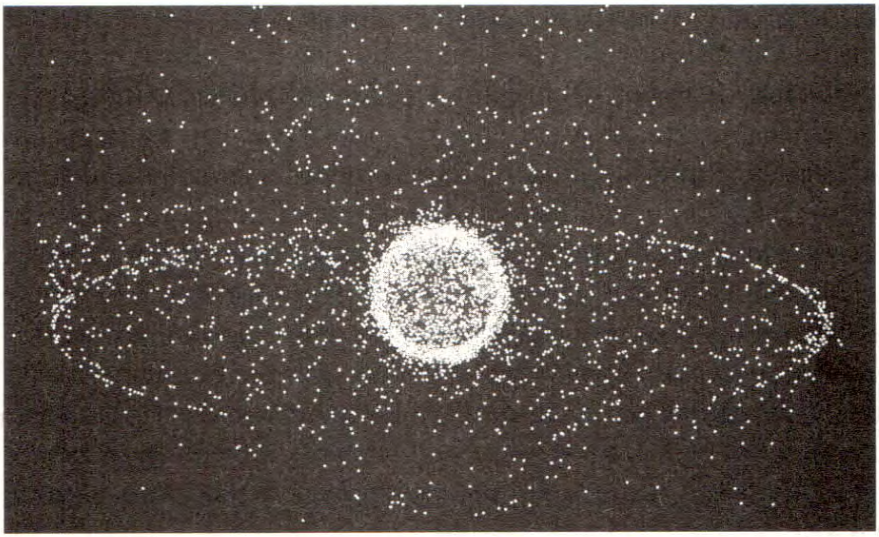
para una colonia espacial permanente. En esa región, ya en la exosfera, la densidad atmosférica es mucho menor, con lo que una colonia podría permanecer orbitando de manera indefinida con muy poco gasto energético, al mismo tiempo que aún se hallaría bajo la protección de los cinturones de Van Allen, lo que haría innecesario un alto nivel de blindaje contra la radiación.

Una colonia orbital cerca de la Tierra haría también un excelente papel como espaciopuerto desde el que partir hacia el resto del sistema solar, al no ser necesario el delta-v que requiere un despegue desde la superficie terrestre, que consume la mayor parte del gasto energético de un vuelo espacial. Este papel sería más relevante incluso en una órbita halo alrededor de un punto de Lagrange, cercano para aprovechar las autopistas del sistema solar, o si se construyera un ascensor espacial, situando en este caso la colonia en una órbita geoestacionaria ecuatorial. En estos emplazamientos, sin embargo, cualquier habitáculo requerirá una alta protección contra la radiación, ya que se encuentran mucho más allá de la magnetosfera terrestre y no contarían con su protección.

Tanto la NASA como la Agencia Espacial Europea han anunciado planes para una futura estación espacial en las proximidades de la Luna, la Deep Space Gateway (DSG), que se pondría en funcionamiento en pocos años y que contaría con la colaboración de los mismos socios que la ISS. Menor que la ISS, según los primeros planes, la DSG será la primera estación cuya órbita hará uso de los puntos de Lagrange: se planea mantenerla en una variedad especial de órbita en halo, conocida como *órbita cuasirrectilínea*, que orbita a la vez ambos puntos de Lagrange L1 y L2 del sistema Tierra-Luna. A efectos prácticos, será una órbita polar muy elíptica alrededor de la Luna, siempre encarada hacia la Tierra, de manera que en todo momento la estación pueda comunicar por radio con nuestro planeta y que sus paneles solares estén iluminados por el Sol de forma constante. Como en todas las órbitas en halo, necesitará pequeñas maniobras periódicas para corregir su posición y velocidad.

> ¿QUIÉN RECOGE LA BASURA ESPACIAL?

Se denomina síndrome de Kessler a un evento en el que la destrucción de un satélite en órbita crearía residuos, que aumentarían en cascada el riesgo de nuevos impactos con otros dispositivos en órbitas cercanas. La proliferación de basura espacial podría llegar a crear serias dificultades y, según algunos estudios, se acumulan unos 29 000 objetos de un tamaño mínimo de 10 cm alrededor de la Tierra, con una densidad máxima en una región de las órbitas LEO entre los 800 y 1 400 km de altura. La recogida de estos cuerpos es una tarea que se deberá emprender en un futuro cercano, para garantizar la seguridad, en especial en las órbitas más utilizadas, donde se mantienen satélites artificiales que han quedado tecnológicamente obsoletos o inservibles. Para llevarla a cabo, se han propuesto soluciones como naves automáticas interceptoras, que localicen y capturen los restos peligrosos.



— Imagen generada por ordenador de la distribución de la basura espacial. Los puntos representan la situación de los restos, que se agrupan en órbitas tipo LEO, muy cercanas a la Tierra, y en un anillo exterior, correspondiente a órbitas geoestacionarias.

¿Con o sin gravedad?

La construcción en gravedad cero es una ventaja, pues se pueden armar infraestructuras inmensas sin miedo a que colapsen sobre sí mismas por su peso. Su potencial de crecimiento es enorme, no habiendo un límite teórico superior al tamaño que pueda alcanzar una colonia espacial, ni a la población que pueda acoger. Estas estructuras pueden diseñarse para que sean modulares y permitan un crecimiento acumulativo, con la incorporación de nuevas unidades. A este propósito, conviene mencionar los éxitos obtenidos en pruebas realizadas con módulos hinchables habitables, como los ensayados en la ISS por la empresa Bigelow Aerospace: el módulo BEAM (*Bigelow expandable activity module*) lleva instalado en esta estación espacial desde 2016 con unos rendimientos excelentes. Tanto su coste de fabricación como el de lanzamiento son reducidos, ya que son estructuras muy ligeras y se pueden plegar para que ocupen poco espacio, cabiendo en cohetes de menor tamaño que los habituales.

Pero la gravedad cero también es un inconveniente: además de su incidencia en la salud humana, muchos materiales ven modificadas sus propiedades. El fuego, por ejemplo, se comporta de manera diferente: las llamas tienden a ser esféricas y los gases calientes no se elevan, pues sin la atracción gravitatoria no existe ni un arriba ni un abajo. Para paliarlo, aunque una centrifugadora puede emular con éxito la gravedad, hacer girar toda una estación modular supondría un serio problema. Puede ser más práctico disponer de módulos giratorios, dejando inmóvil el resto de la estructura. En este sentido, hay proyectos para instalar en la ISS un módulo centrifugador con la finalidad de ensayar los resultados de esta solución tecnológica.

Los diseños más ambiciosos plantean la construcción de estaciones espaciales giratorias en forma de cilindro, disco o anillo toroidal, en las que toda la estructura más alejada del centro esté

dotada de gravedad artificial. Este diseño no sería fácilmente ampliable, ya que los módulos giratorios solo se podrían concatenar en su eje de rotación, si bien la ventaja de contar con gravedad en la mayor parte de su volumen hace que este tipo de colonias sigan siendo objeto de estudio. Los primeros diseños realistas de estaciones espaciales se basaron en estas formas.

Entre las estructuras pioneras se cuenta la esfera de Bernal, propuesta en 1929 por el físico irlandés John D. Bernal, que diseñó una esfera giratoria en cuyo interior se establecería la colonia. Su mayor ventaja sería la gran área habitable, en proporción al material necesario para construirla, pero sufría el inconveniente de tener gravedades artificiales diferentes según la región de la esfera. El toro de Stanford, de 1975, resuelve este inconveniente: consiste en un anillo toroidal giratorio, muy similar a la estación espacial que aparece en la película *2001, Una odisea del espacio*, de 1968, aunque contaría con un descomunal espejo que iluminaría su interior. En 1977, el físico estadounidense Gerard K. O'Neill añadió a la lista otro diseño clásico: el cilindro de O'Neill, que, en realidad, estaría formado por dos cilindros que girarían en sentidos opuestos, para evitar que el sistema tuviera un momento angular neto, con sus ejes apuntando al Sol y de nuevo grandes espejos iluminando el interior.

La dificultad técnica de estas grandes ciudades en órbita es aún un reto a superar, y su diseño tiende a cierta simplificación, ya que datan de los inicios de la exploración espacial, cuando las condiciones reales del espacio eran poco conocidas. No por ello se ha abandonado este tipo de proyectos, entre los que destaca el llamado Kalpana One, bautizado así en honor de la astronauta Kalpana Chawla, muerta en la tragedia del transbordador *Columbia*. Basado en el cilindro de O'Neill, este diseño intenta ser más realista que los anteriores, y se está usando como banco de pruebas para estudiar la factibilidad y detectar los problemas que puede presentar una ciudad orbital.

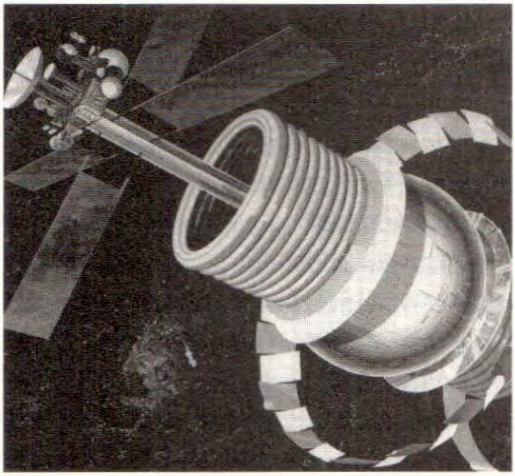
LA LUNA, ESTACIÓN INTERMEDIA

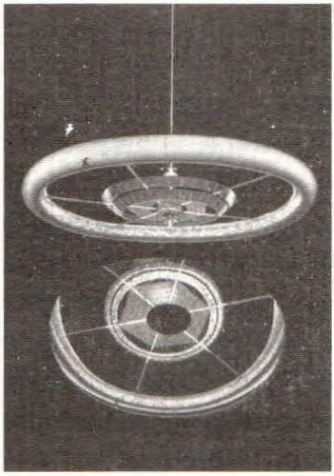
Aunque un esquema de colonización espacial propuesto en ocasiones sea implantar ciudades orbitales alrededor de otros planetas, resultaría más práctico establecer colonias en mundos con una superficie firme, al ser así más fácil acceder a los recursos del mundo a fin de disponer los materiales necesarios para la construcción y mantenimiento de las colonias. Además, buena parte de la tecnología necesaria para estas bases se puede poner a punto en la Tierra.

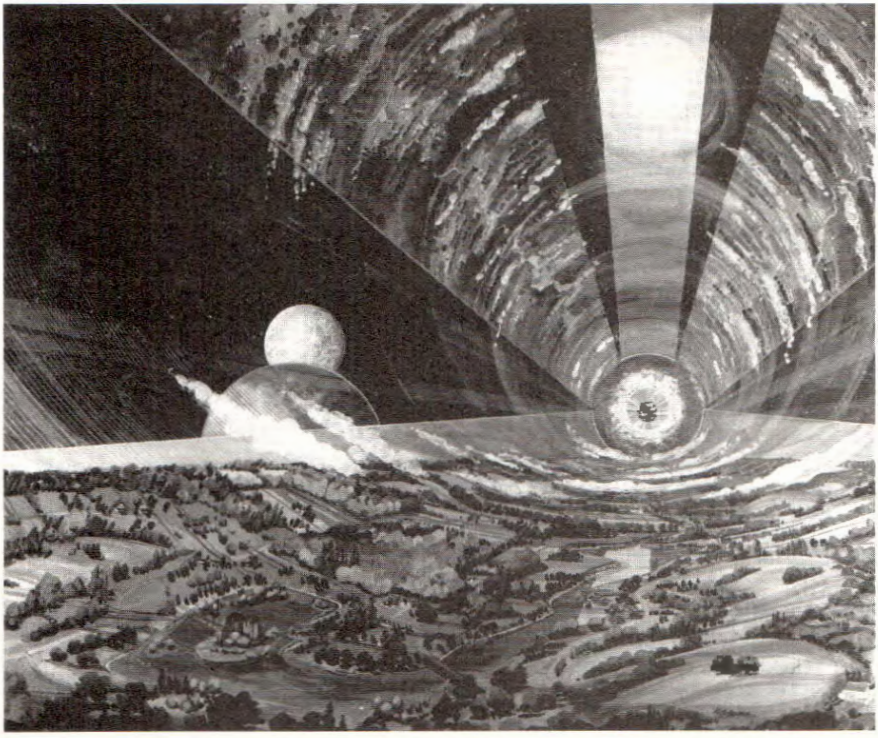
Para hacer realidad tal tipo de colonias será fundamental establecer antes una base en la Luna, donde todas estas tecnologías se puedan poner a prueba y perfeccionar en condiciones reales. Con la nueva generación de cohetes SLS que desarrolla la NASA, el viaje llevará solo dos o tres días, muy poco tiempo en términos astronómicos, lo que redunda en una gran ventaja logística: compárese con un viaje a Marte con la misma tecnología, de en torno al año de duración, que además solo puede abordarse una vez cada dos años, cuando las posiciones de la Tierra y Marte permiten una órbita de transferencia óptima. El interés por ir a la Luna cobrará así nuevo auge y el proyecto de la estación espacial cislunar DSG será parte de este esfuerzo conjunto por volver a nuestro satélite, esta vez con vistas a establecer una presencia permanente.

Excavar en el espacio

La Luna es una inestimable fuente de recursos por explotar. Hacer rentable la exploración lunar será un requisito para que esta continúe y se consolide. En el suelo de la Luna no parece haber menas de minerales a flor de superficie, pero sus rocas contienen elementos valiosos que se pueden aislar mediante métodos químicos. Posiblemente el más valioso de ellos, si en algún momento la fusión







— Representaciones artísticas de una esfera de Bernal (arriba izquierda), de un toro de Stanford (arriba derecha) y del interior de un cilindro de O'Neill (abajo).

nuclear consigue establecerse como fuente energética viable, sea el helio-3, un isótopo de este gas noble particularmente apto para ser usado como combustible nuclear.

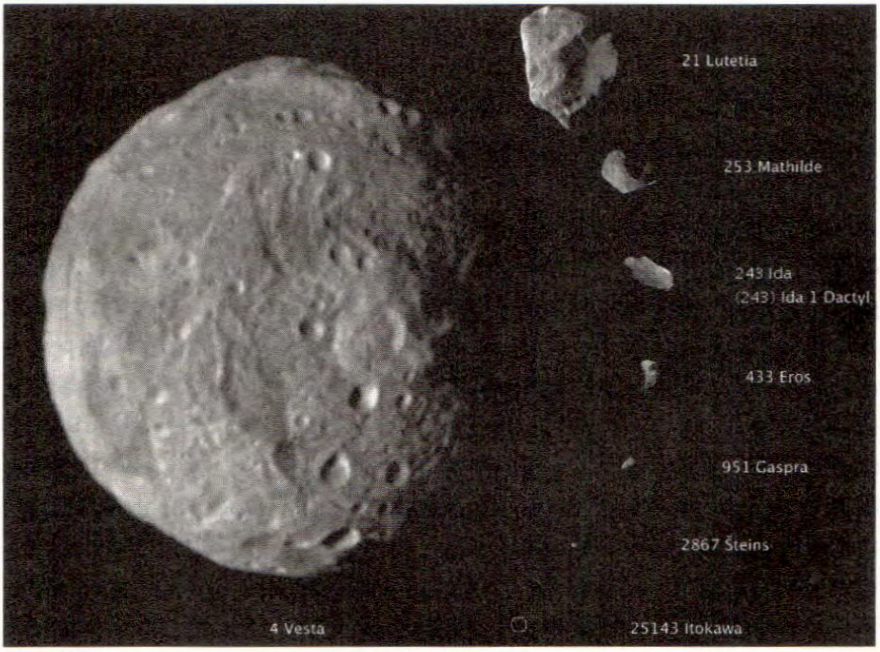
Aunque el helio-3 es uno de los componentes del viento solar, producido y expulsado por el Sol de forma constante, los cinturones de Van Allen lo repelen, junto con la pantalla adicional de la atmósfera, por lo que la Tierra no llega a recibir el helio-3 solar y solo cuenta con el que quedó atrapado en el interior del planeta cuando este se formó. En la Luna, en cambio, la falta de campo magnético y de atmósfera permite que el helio-3 que llega del Sol pueda ser absorbido por el suelo y acumularse, como ha estado haciendo durante millones de años.

La abundancia de este material en la Luna podría satisfacer la demanda global de energía de nuestro planeta durante siglos. Para enviar cargamentos de este material a la Tierra se podrían usar cañones electromagnéticos, unos dispositivos en forma de tubos de varios kilómetros de longitud, a lo largo de los cuales una serie de electroimanes impulsarían cada envío hasta que superase la velocidad de escape lunar cinco veces menor que la terrestre, dada la menor gravedad y la ausencia del freno atmosférico. Así, resultaría mucho más viable enviar materias primas a otras bases del sistema solar desde la Luna que desde la Tierra.

Las rocas lunares son abundantes en aluminio, hierro, titanio, silicio y oxígeno, en forma de metales oxidados. El suministro de este último elemento resultaría vital para una colonia lunar, no solo como componente de una atmósfera respirable, sino también como propelente para los cohetes químicos, imprescindible para la combustión. La producción de oxígeno para ofrecer servicios de reabastecimiento a las naves espaciales bien podría convertirse en una importante industria lunar. Hay también agua en el sustrato en forma de hielo, aunque no en grandes cantidades, pero su concentración aumenta hacia las regiones polares, donde alcanza las 750 partes por millón, una proporción menor que las que se regis-

> MINERÍA EN LOS ASTEROIDES

En el sistema solar hay una región donde abundan las materias primas y el campo gravitatorio es casi despreciable: el cinturón de asteroides. La gravedad en estos cuerpos es muy baja y la velocidad de escape es de unos pocos centenares o decenas de kilómetros por hora. Por su pequeño tamaño, se podrían rodear con estructuras hinchables, que recogerían los materiales que se evaporan. El envío de materiales hacia los planetas interiores aprovecharía la gravedad solar, con poco gasto energético. Los asteroides son una reserva de elementos escasos o sobreexplotados en la Tierra, como el iridio, el oro, el platino, el hierro y las tierras raras. La explotación de uno solo de ellos podría proporcionar, por ejemplo, más platino del que se ha extraído en nuestro planeta en toda la historia.



— Composición fotográfica con ocho de los asteroides examinados por sondas espaciales, representados con una misma escala.

tran en los desiertos más secos de la Tierra, pero suficiente como fuente alternativa de oxígeno e hidrógeno. De hecho, por este motivo muchos de los planes de colonización lunar prevén establecer las primeras bases cerca de estas áreas.

La Luna es la fuente de materiales más cercana disponible fuera del pozo gravitatorio de la Tierra, por lo que puede constituirse en la principal fuente de minerales en bruto para otros emplazamientos, incluyendo ciudades orbitales alrededor de la propia Tierra. A largo plazo, la minería será una de las principales ocupaciones de las colonias lunares.

Arquitectura lunar

Los materiales para construir los primeros hábitats lunares deberán ser ligeros, ya que tendrán que ser impulsados fuera del campo gravitacional de la Tierra usando cohetes. Los módulos hinchables como los probados en la ISS cumplen el primer requisito y son una forma rápida y ligera de fabricar habitáculos presurizados que se pueden interconectar modularmente entre sí. El principal problema es la defensa frente a la elevada radiación ionizante en la superficie lunar. A este respecto, el propio suelo del satélite tiene la respuesta, pues está cubierto por una capa de fina arena y polvo que se podría utilizar para rellenar bolsas con las que recubrir los habitáculos. Seleccionando los materiales de color más claro posible, se conseguiría reflejar la luz solar y evitar el riesgo de sobrecalentamiento, que en el vacío es un factor crítico, dada la imposibilidad de transmitir el calor a una atmósfera inexistente. Por estas razones convendría que las zonas de aterrizaje y despegue estuvieran relativamente lejos de los enclaves habitados, a fin de evitar que los cohetes levantaran polvo que se depositara sobre el resto de estructuras, pues el suelo lunar es en realidad muy oscuro: refleja solo alrededor del 7 % de la luz que recibe, absorbiendo el resto.

A medio plazo, la construcción de bases subterráneas podría ser una solución más práctica conforme la colonización se consolidase. No solo se evitaría la radiación ionizante, sino que el suelo lunar se mantiene a temperatura constante a lo largo del año. Las temperaturas que pueden ocasionar el largo ciclo lunar en la superficie (14 días de luz seguidos de 14 días de oscuridad) van de unos 120 °C durante el día a –170 °C por la noche, mientras que bajo tierra se mantienen alrededor de los –23 °C, fáciles de afrontar con un buen sistema de calefacción. Algunas propuestas sugieren que la primera base lunar se debería instalar en el interior de uno de los tubos de lava que afloran en varios puntos de la Luna, algunos de un tamaño que podría albergar una ciudad. La estabilidad de estos tubos de lava se desconoce, pero en la Luna no hay grandes terremotos y estos tubos parecen haber permanecido inalterables durante millones de años.

Imprimir edificios

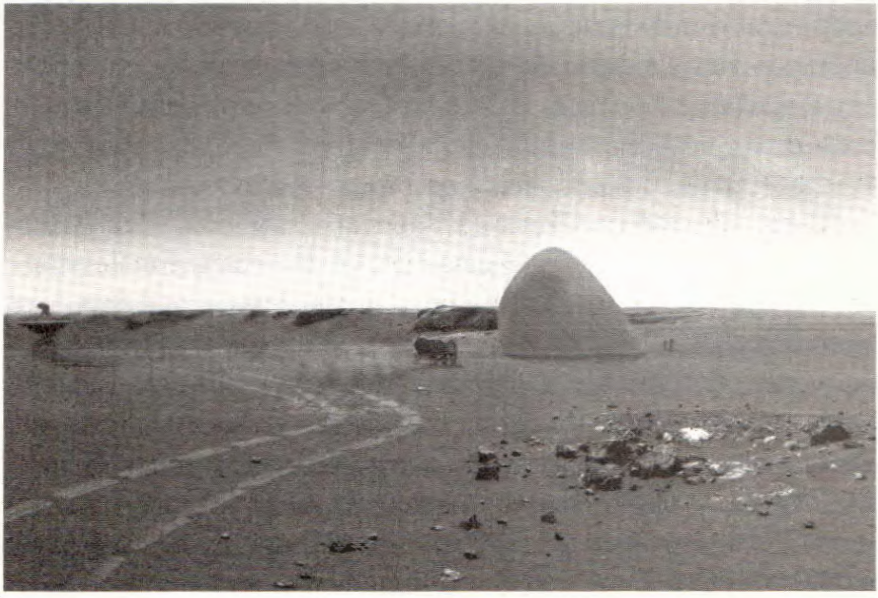
El equipo de arquitectos de Norman Foster ha propuesto, en colaboración con la ESA, un enfoque realmente revolucionario: ¿por qué no imprimir los habitáculos con técnicas de impresión 3D? En la Tierra ya se han fabricado las primeras casas de manufacturación aditiva, a partir de piezas elaboradas con este sistema, y basándose en la extrusión de hormigón o cemento desde un cabezal controlado por una grúa robotizada, es posible construir un recinto de reducidas dimensiones en 24 horas y con un coste muy bajo. En las condiciones de extrema sequedad de la Luna el cemento fraguaría con rapidez, pero, aunque en el suelo de la Luna abunda la materia prima para su fabricación, la falta de agua hace inviable el uso de los cementos tradicionales. La propuesta del equipo de Foster es emplear una especie de hormigón en seco, mezclando la tierra lunar con el también abundante óxido de magnesio, lo que produciría una pulpa que es posible extrudir o rociar. La apli-

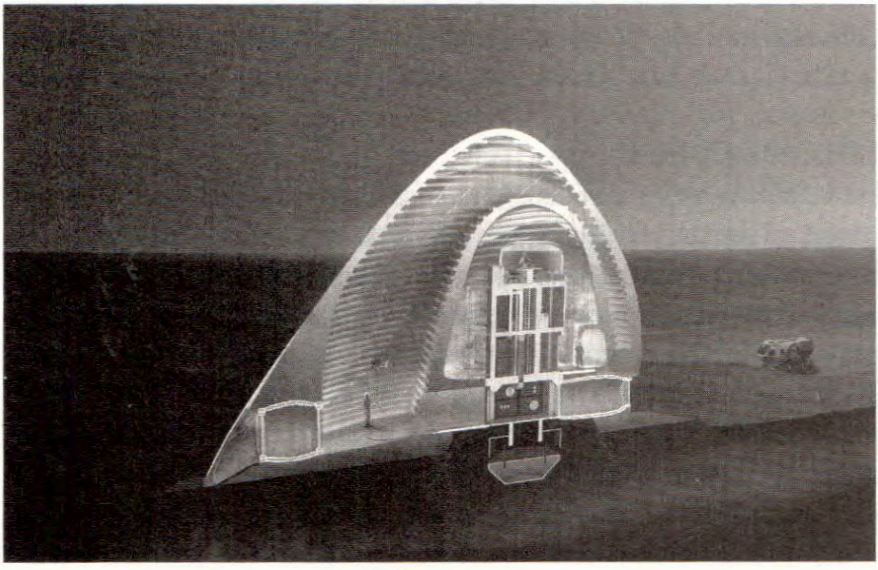
cación posterior de una sal de cohesión transformaría este material blando en una sustancia rocosa muy resistente. El equipo de Foster, usando suelos de composición similar a la lunar y óxido de magnesio, ha conseguido fabricar un bloque de pared de tonelada y media de peso, formado por celdillas hexagonales que aumentan su resistencia.

> Cuando establezcamos las primeras colonias humanas en la Luna o en Marte, construiremos lo que necesitemos allí mismo, cuando lo necesitemos.
>
> MIKE CHEN

En el proyecto, solo el exosqueleto de la base se construiría de esta manera. Los verdaderos habitáculos estarían formados por estructuras hinchables sobre las que se imprimiría la estructura de hormigón lunar como protección contra la radiación y los micrometeoritos. Aunque más compleja que la técnica de apilar contenedores de material lunar, esta alternativa sería más flexible y permitiría crear estructuras más rígidas y de mayor tamaño. Además, si los ensayos en la Luna fueran positivos, sería un método constructivo exportable a, por ejemplo, Marte, donde se podría adaptar empleando agua líquida, según la propuesta que presentó a la NASA un equipo formado por Clouds Architecture Office y Space Exploration Architecture. En principio, sería posible imprimir un recinto usando agua líquida que, al quedar expuesta a las temperaturas bajo cero ambientales, se solidificaría en forma de hielo en muy poco tiempo. Aunque factibles, estos iglús marcianos deberían reservarse para las zonas polares, pues en las regiones templadas marcianas no es infrecuente alcanzar temperaturas por encima de los 0 °C.

La manufacturación aditiva será una tecnología imprescindible en la exploración espacial, no solo en lo referente a la fabricación de habitáculos: en pruebas experimentales, se ha logrado imprimir, usando metales y aleaciones, componentes de cohetes como una turbobomba funcional y componentes metálicos de gran ta-





— Representaciones artísticas de una construcción con impresora 3D de agua en Marte, según la propuesta de Clouds Architecture Office y Space Exploration Architecture, vista desde el exterior (arriba) y en sección (abajo).

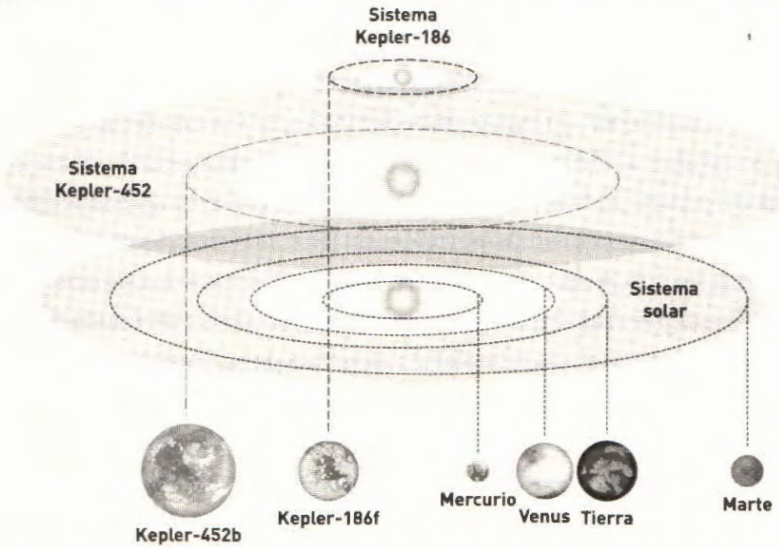
maño. Con la mejora de los dispositivos de impresión 3D, se prevé imprimir partes enteras de cohetes y herramientas de precisión. Propuestas más futuristas incluyen el proyecto SpiderFab, una especie de impresora orbital de gran tamaño que conformaría en el espacio grandes componentes para naves espaciales.

Las ventajas de la impresión 3D para la exploración espacial son muchas: al no generar apenas desechos, economiza mucho material y favorece la reducción de costes. Es un proceso relativamente rápido, que además ahorraría espacio de carga en las naves, al no ser necesario llevar componentes de repuesto sino solo los consumibles empaquetados de forma compacta. Fabricar *in situ* los repuestos será fundamental para misiones de larga duración, convirtiéndose en un factor de autonomía tecnológica. Si a ello se añade el uso de la impresión 3D para la obtención de tejidos biológicos artificiales, de acuerdo con una de las más novedosas líneas de investigación médica, queda claro que este conjunto de técnicas se convertirá en uno de los pilares de la colonización del espacio.

COLONIZAR EL PLANETA ROJO

Marte es, sin duda, el principal objetivo de la colonización espacial a medio plazo. Además de su proximidad, en términos astronómicos, se sabe que tiene cantidades notables de agua, al menos en forma de hielo, y se asemeja mucho a la Tierra en varios aspectos: un día de casi idéntica duración (24 h y 40 m), un área similar a la de los continentes terrestres y temperaturas relativamente contenidas gracias a su tenue atmósfera. Al igual que nuestro planeta, Marte está dentro de la llamada *zona de habitabilidad* del sistema solar (fig. 1), la región en la cual la radiación solar puede mantener temperaturas en la superficie planetaria que permitan la presencia de agua líquida, aunque el que luego sea así puede depender de otros factores, como la presión atmosférica o la presencia de gases con

Fig. 1



Zonas de habitabilidad del sistema solar y de los sistemas planetarios de las estrellas Kepler-186 y Kepler-452. Su extensión depende, en cada caso, de las características del astro central.

efecto invernadero. De hecho, en la región ecuatorial de Marte las temperaturas diurnas pueden alcanzar los 20 °C en verano, mientras que en general las mínimas rara vez son inferiores a –80 °C.

Hay numerosas pruebas de la existencia pasada de abundante agua líquida en Marte durante millones de años, y por tanto de una elevada presión atmosférica: múltiples cauces secos de ríos, estructuras en forma de isla, estratos sedimentarios o minerales como la jarosita, que solo se forman en presencia de agua líquida. En algún momento, Marte padeció un tremendo cambio climático que le hizo perder sus mares y lo convirtió en el seco y frío desierto actual, con una presión atmosférica que es el 0,6 % de la terrestre. Se supone que la mayor parte de toda aquella agua quedó atrapada, de una u otra forma, en el subsuelo del planeta.

Los datos de la sonda *Mars Odyssey* demostraron que en latitudes en torno a los 60° norte y en buena parte del hemisferio sur hay una inmensa abundancia de hielo bajo el suelo marciano, a una profundidad de poco más de 1 m, en forma de un terreno helado similar al del permafrost terrestre. Se especula que, acumulada de esta forma, Marte poseería agua más que suficiente para formar un océano. Más interesantes aún son los indicios de la presencia actual de agua líquida subterránea. La sonda *Mars Global Surveyor* descubrió la existencia de erosiones similares a torrenteras que parecían haber sido formadas por surgimientos de agua en la ladera de varios cráteres, abundantes entre los 30° y 60° sur, en buena parte coincidiendo con ubicaciones en las que la *Mars Odyssey* descubrió hielo. El posterior seguimiento de estas formaciones detectó en al menos tres ocasiones lo que parecía una sustancia líquida oscureciendo el terreno a su paso. Con todo, no hay aún unanimidad sobre si estos fenómenos están realmente relacionados con agua, si es hielo de dióxido de carbono o si se trataría de una mezcla de agua y percloratos o salmueras, o incluso de arenas muy finas, que pueden tener un comportamiento similar al de un líquido.

En todo caso, hay indicios muy fiables de que Marte tiene mucha agua, aunque sea en forma de hielo, lo que resultaría fundamental para la supervivencia de una colonia. Por todo ello, Marte sería, con mucho, el planeta más fácil de colonizar. Bajo una cobertura de cúpulas transparentes presurizadas sería posible cultivar plantas, dada la riqueza en minerales del suelo marciano y la abundancia de radiación del Sol, que aunque brilla un 40 % de lo que lo hace en la Tierra, resultaría más que suficiente para la fotosíntesis vegetal: un experimento del International Potato Centre en Perú simuló la radiación solar que llega a Marte, su composición atmosférica, una presión baja como la que hay en la Tierra a 6 km de altitud (las plantas no pueden sobrevivir a la casi nula presión ambiente de Marte) y temperaturas bajo cero, demostrando que las patatas crecen aun

en estas duras condiciones. Conocer cuáles son los límites inferiores a la supervivencia de las plantas y probar que pueden sobrevivir en un invernadero con presión reducida y altos niveles de dióxido de carbono es un resultado muy positivo para los proyectos de colonización del planeta rojo.

Con agua disponible resulta sencillo obtener oxígeno e hidrógeno: tan solo se necesita una fuente de energía, que en Marte podría ser la de la luz solar. La fabricación eficaz de gas hidrógeno en estas condiciones llega en los ensayos experimentales al 30 % en electrolisis fotovoltaica, de manera que sería rentable almacenar el hidrógeno creado cuando hay luz para usarlo como fuente de energía cuando no la hay, subsanando así el problema de acumular la electricidad en baterías, que con el paso del tiempo se degradan.

Por otro lado, pese a que hay veloces vientos en Marte, los aerogeneradores no parecen ser una solución viable: un 0,6 % de presión atmosférica implica un 0,6 % de fuerza para la misma velocidad de viento, y como la fuerza ejercida por el viento depende del cuadrado de su velocidad, para lograr el mismo empuje que un viento terrestre la velocidad del marciano debe ser 13 veces mayor. Si en la Tierra un aerogenerador industrial comienza a funcionar a partir de los 10 km/h, en Marte necesitaría una velocidad mínima del viento de 130 km/h, pero los vientos más veloces medidos durante las tormentas marcianas apenas alcanzan los 100 km/h. Tampoco parece que la energía geotérmica sea un recurso a explotar ni en Marte ni en la Luna, puesto que el interior de estos mundos, más pequeños que la Tierra, se enfrió hace millones de años y haría falta excavar decenas o centenares de kilómetros para llegar a zonas con temperaturas lo bastante altas como para lograr una producción energética útil.

Aparte de la solar, la única otra fuente de energía viable en Marte es la nuclear, usando el uranio detectado en los exámenes de los minerales marcianos, que podría ser relativamente fácil de encontrar en el interior de los cráteres de impacto, que ponen al descubierto las menas subterráneas de minerales. En cambio, al contrario que

en la Luna, no hay helio-3 para usarlo en un reactor de fusión: como la terrestre, la atmósfera marciana detiene los átomos de este elemento que provienen del Sol e impide que penetren en el suelo quedándose en la atmósfera, de donde, dada la ligereza de estos átomos y la baja gravedad de Marte, escapan con facilidad al espacio. De todas maneras, cabe la posibilidad de encontrar este isótopo en los satélites marcianos Fobos y Deimos, carentes de atmósfera.

UN EXAMEN AL RESTO DEL VECINDARIO

Las colonias en Marte y la Luna, cuando se establezcan, serán durante mucho tiempo nuestras únicas bases permanentes en otros mundos, gracias a su proximidad a la Tierra y a las condiciones favorables a la construcción de asentamientos humanos. La resolución de los problemas de vivir en estos enclaves y el avance de la tecnología que ello supondrá, harán que tarde o temprano fijemos nuestras metas en el resto de planetas del sistema solar.

En muchos sentidos, Mercurio es casi un gemelo de la Luna, por lo que cualquier cosa que sea aplicable a la colonización de nuestro satélite sería en principio aplicable al planeta más cercano al Sol. Como principales diferencias están su tamaño algo mayor, su lejanía de la Tierra y un largo ciclo día-noche, el doble que el lunar, que con la mayor proximidad al Sol produce temperaturas más extremas. Por otro lado, también es posible que disponga de mejores depósitos de helio-3. Como en la Luna, la región polar resulta un emplazamiento apropiado para la colonización, al haber numerosos depósitos de hielo y temperaturas menos extremas.

Por su parte, en Venus se registran las temperaturas más altas de entre todos los planetas del sistema solar, lo que dificulta en grado extremo su colonización, aunque no la imposibilita. Finalmente, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno son grandes globos gaseosos sin

una superficie rocosa en la que asentarse, pero guardan a su alrededor un tesoro: tienen lunas de gran tamaño que, en algunos casos, poseen océanos de agua líquida en su subsuelo, lo que las hace en principio destinos idóneos para la colonización.

Un mundo de agua

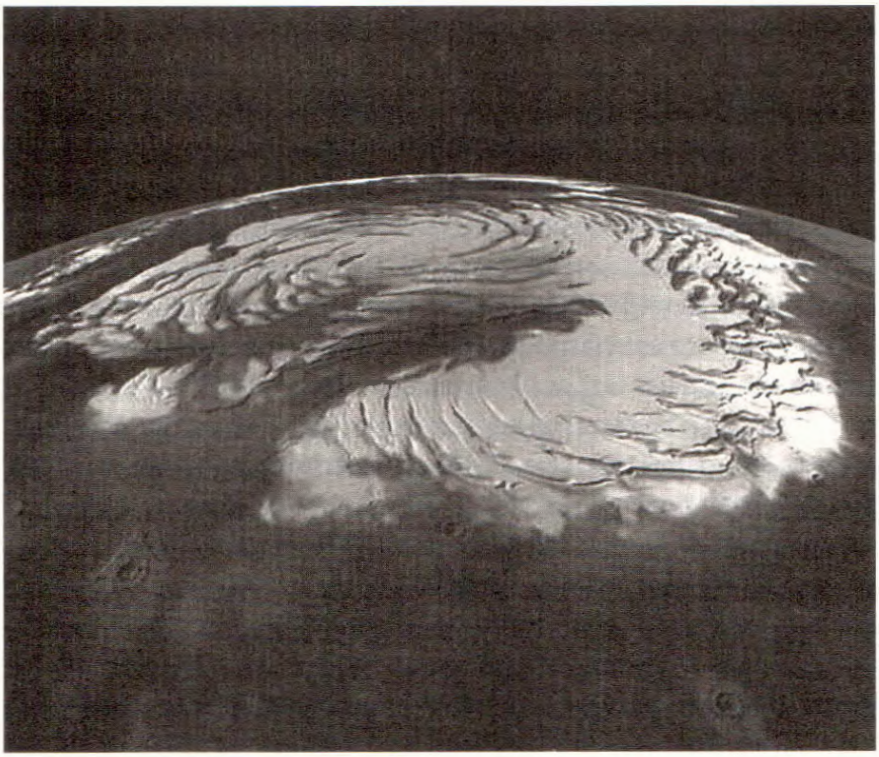
La primera luna de la que se sospechó que tenía un océano bajo su superficie fue Europa, un satélite de Júpiter totalmente recubierto de hielo. Las imágenes de alta resolución que tomó la sonda *Galileo* mostraron unas formaciones de hielo que parecían icebergs sobre un mar congelado, como si en algún momento la dinámica del satélite hubiera roto la corteza de hielo y durante un breve tiempo los bloques fracturados hubieran flotado, hasta que de nuevo el agua se volvió a congelar, restaurando la corteza sólida y sellando la fractura. Europa tiene también un débil campo magnético secundario, que cambia de orientación según describe órbitas alrededor de Júpiter, alineándose con la mucho más potente magnetosfera joviana. La existencia del magnetismo europano implica la presencia a gran escala de un fluido conductor de la electricidad, probablemente de agua líquida salada. El análisis remoto de la superficie del satélite detectó la presencia de sal, dando apoyo a esta hipótesis. Todas estas pruebas indirectas hablan de un océano de extensión global, que podría hacer que, incluyendo la corteza exterior de hielo, Europa poseyera en términos absolutos más agua que la Tierra. No se conoce con certeza el grosor que puede tener la capa de hielo superficial, pero algunos modelos hablan de pocos kilómetros, incluso centenares de metros en algunas regiones, pues el telescopio espacial *Hubble* ha detectado emisiones de penachos superficiales de vapor de agua procedentes de algún tipo de géiser.

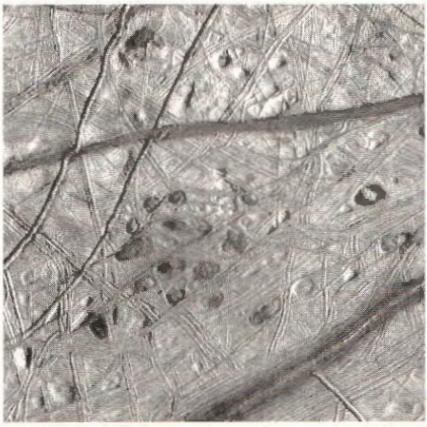
¿Cómo es posible la existencia de agua líquida en una región que está mucho más allá de la zona de habitabilidad? La explicación más

aceptada es que la gravedad de Júpiter induce enérgicas fuerzas de marea en el interior rocoso de Europa, calentándolo por rozamiento, lo que a su vez calienta y derrite el hielo de la capa que lo rodea, produciéndose el océano bajo hielo de este satélite. En un mundo como Europa, con un interior caliente, la energía geotérmica sí parece una fuente viable de energía, probablemente incluso más eficaz que la luz del Sol, que llega con una intensidad 25 veces menor que la que se tiene en la Tierra. Con hielo en abundancia, una colonia humana podría, además de estar bien abastecida de aire y agua, generar oxígeno e hidrógeno para las naves espaciales, un factor de especial relevancia ya que hace falta mucho combustible para escapar del poderosísimo pozo gravitatorio de Júpiter. Por otro lado, como todo el satélite es un glaciar, el acceso a minerales no sería sencillo. Pero muy cerca orbita otra luna, Io, que al hallarse a una distancia más próxima de Júpiter padece unas fuerzas de marea aún más intensas, lo que la convierten en el mundo con mayor vulcanismo del sistema solar, y en una importante fuente de materias primas.

Desprotegidos en el interior del escudo protector

Los satélites de Júpiter sufren, para su colonización, de un problema paradójico: la magnetosfera del planeta es la más potente de todo el sistema solar, tanto que sus flecos llegan incluso hasta la órbita de Saturno. Júpiter tiene el equivalente a unos cinturones de Van Allen, donde queda atrapada la radiación, aunque miles de veces más intensos. Estar bajo estos cinturones es sin duda un excelente paraguas contra la radiación cósmica, pero las principales lunas de Júpiter no están debajo, sino *dentro*, lo que significa que están expuestos a elevadísimos niveles de radiación ambiente. Por ejemplo, según algunas estimaciones, en Europa es dos millones de veces mayor que en la Tierra, una dosis diaria incompatible con un asentamiento humano. En consecuencia, un asentamiento huma-





— Arriba, casquete de hielo en el polo norte de Marte. Abajo, superficie helada de Europa (izquierda) y relieve volcánico de Io (derecha), con un penacho eruptivo en el horizonte.

no requeriría un blindaje muy significativo o el establecimiento de la colonia bajo una gruesa capa de hielo.

En Io, donde la minería resultaría particularmente atractiva, la situación es peor, al estar más cerca de Júpiter: se ha calculado que su radiación ambiente es siete veces más intensa aún que en Europa. Más lejos de Júpiter se encuentra Ganímedes, el satélite más grande del sistema solar, casi del tamaño de Marte. Su superficie muestra regiones de diferente composición, con mezclas de hielo y roca, y a 800 km bajo esa amalgama helada también parece haber un océano subterráneo análogo al de Europa. Ganímedes es, además, la única luna de Júpiter que posee una intensa magnetosfera propia. Esto, junto con la mayor lejanía, hace que su radiación ambiente estimada sea 70 veces menor que la de Europa, aunque aún es unas 300 veces mayor que la de Marte. Solo Calisto, más lejos todavía, no se ve afectada por los cinturones de radiación de Júpiter y, dada su distancia al Sol, su radiación ambiente es incluso menor que la que encontramos en la Luna, de un nivel similar a la de la ISS. Esta luna podría ser el mejor candidato a la colonización en el sistema joviano.

Junto a los anillos de Saturno

La magnetosfera de Saturno es menos potente que la de Júpiter, y a pesar de que está el doble de lejos de la Tierra y la luz del Sol es 100 veces más débil que en nuestro entorno, se encuentran ambientes muchos más propicios para la colonización humana, como en Mimas, un pequeño satélite con tenues indicios de poseer agua subterránea. Encélado, una luna muy similar en todos los aspectos a Europa, aunque mucho menor, está recubierta de hielo y muestra penachos de géiseres muy frecuentes, lo que parece indicar un interior más caliente. La espectroscopía ha demostrado que los penachos están compuestos de agua salada, que se supone que proviene de un océano oculto a una profundidad de unos 40 km.

Los niveles de radiación que la magnetosfera de Saturno induce en Encélado son comparables a los de la Luna. En definitiva, tiene todas las ventajas de Europa sin sus inconvenientes.

Un problema de todos estos satélites es su carencia de atmósfera, lo que obligaría a cualquier colonia a vivir en compartimentos presurizados. La única excepción es Titán, un satélite similar en tamaño a Ganímedes, con una densa atmósfera compuesta en un 95 % de nitrógeno, un gas en absoluto tóxico pues es también el principal componente de la atmósfera de la Tierra. El resto de componentes son hidrocarburos, como metano o etano, aunque carece de oxígeno libre. La presión atmosférica es una vez y media mayor que la terrestre, muy confortable, teniendo en cuenta que a la máxima profundidad permitida en el buceo recreativo, 40 m, la presión es ya de unas 5 atmósferas. Manteniendo dentro de los habitáculos una presión ligeramente superior del aire respirable, cualquier rotura supondría una pequeña fuga de aire que podría repararse con tranquilidad. La radiación ambiente en Titán es muy baja, en buena parte por la protección adicional de su densa atmósfera, y además parece también tener abundante agua líquida en su subsuelo. Pero lo verdaderamente fascinante de este mundo es que es el único otro lugar, junto a la Tierra, donde se sabe que llueve y hay mares y ríos en su superficie, aunque no sean de agua, sino de hidrocarburos. A las bajas temperaturas de Titán, unos –180 °C, el abundante hielo de agua de su superficie es una roca más de su paisaje. Por su parte, la rica sopa orgánica de sus mares, principalmente metano y etano, constituye una excelente fuente para la fabricación de plásticos y otros materiales para una eventual colonia.

Ciudades flotantes

Con la colonización de los planetas rocosos y de los satélites que puedan contar con océanos interiores no se agota el repertorio de

futuros asentamientos humanos: quedan por evaluar las posibilidades de establecerse en los gigantes gaseosos (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). Estos mundos son una fuente inagotable de hidrógeno, helio (siendo helio-3 uno de cada 10 000 átomos) y metano. Una base en su atmósfera tendría un indudable interés científico. Con tal objetivo, se ha propuesto establecer bases flotantes colgando en enormes globos aerostáticos, a la deriva en la atmósfera de estos planetas, o dotados de motores que, a modo de dirigibles, les permitan maniobrar e igualar velocidades con las naves que aterricen o despeguen de estas bases. Eligiendo la profundidad adecuada, sería posible hallar un entorno con una presión como la terrestre o temperaturas similares. Estas islas artificiales flotantes estarían además protegidas por la magnetosfera de los gigantes gaseosos, proporcionando un ambiente con muy poca radiación ionizante. Tal vez, el principal problema de una base así sea la turbulenta atmósfera de estos mundos gigantes.

> Nuestra única oportunidad para una supervivencia a largo plazo es expandirnos por el espacio.
>
> STEPHEN HAWKING

Esta estrategia también podría ser apropiada para Venus. La densa atmósfera del planeta más cercano a la Tierra, compuesta sobre todo de dióxido de carbono con un elevado efecto invernadero, produce temperaturas en su superficie de más de 450 °C y presiones atmosféricas 90 veces mayores que la terrestre, condiciones muy duras para la colonización. Pero las bases flotantes podrían encontrar una altitud con condiciones casi idóneas: a 55 km de altura la presión atmosférica es de media atmósfera (la que, como referencia, se tiene en el campamento base del Everest) y la temperatura es de 25 °C. A esa altura abundan las nubes de ácido sulfúrico, pero su corrosividad puede solventarse con recubrimientos de vidrio. Además, el propio globo aerostático podría ser el habitáculo de la colonia, ya que la mezcla respirable de nitrógeno y oxígeno

sería un gas que flotaría en la atmósfera de Venus, con un 60 % del poder de sustentación que el helio tiene en la atmósfera terrestre. La capa de atmósfera por encima del globo proporcionaría asimismo protección contra la radiación ionizante. Cierto es que los vientos de Venus a esta altura son poderosos y rondan los 200 km/h, pero la dirección de los mismos suele ser constante, y una base aerodinámica anclada al suelo o incluso con alas que aprovecharan la sustentación adicional producida por esos vientos podría soslayar este inconveniente. Aunque tal vez sería mejor dejarse llevar: el día de Venus equivale a 116 días de la Tierra, pero yendo a la deriva con los vientos podría conseguirse un día artificial equivalente a una de nuestras semanas.

FABRICAR NUEVAS TIERRAS

La terraformación es un proceso hipotético por el cual se transformaría un mundo inhóspito para que se asemejara al nuestro. Los posibles candidatos para una intervención de este tipo, en nuestro sistema solar, son Marte y Venus.

Se sabe que Marte tuvo en el pasado mares y una atmósfera más densa, rica en dióxido de carbono, que se supone que quedó atrapado en el helado suelo marciano. Si se pudiera calentar el planeta, volvería a pasar a la atmósfera y la temperatura aumentaría por efecto invernadero, produciendo la liberación de vapor de agua. Para lograrlo, se podría distribuir en la superficie del planeta polvo oscuro para absorber mejor el calor de la luz solar, o, desarrollar cepas de cianobacterias, líquenes u otros organismos fotosintéticos oscuros, capaces de sobrevivir y prosperar en las actuales condiciones marcianas, que tendrían el mismo efecto, además de liberar oxígeno a la atmósfera.

Para terraformar Venus sería necesario justo lo contrario: eliminar la inmensa cantidad de dióxido de carbono presente en su

atmósfera, causante de sus elevadas temperaturas. Se empezaría colocando en el punto de Lagrange L1 de Venus una pantalla tan extensa como para cubrirlo con su sombra y, una vez se hubiera enfriado lo suficiente, se procedería a bombardearlo con cometas, para que su agua creara mares que, con el tiempo, absorberían el dióxido de carbono.

LA ÚLTIMA FRONTERA

Las posibilidades de colonización del espacio no se detienen en el sistema solar, aunque para ello sea necesario conseguir salvar las inmensidades interestelares. La astronomía ha desarrollado métodos con los que consigue, cada vez con mayor frecuencia, localizar los llamados *planetas extrasolares*, que forman sistemas planetarios alrededor de otras estrellas. Con procedimientos de análisis muy refinados, se llega a identificar cuáles de estos cuerpos se encuentran en la zona de habitabilidad de su sistema, lo que los convierte en candidatos óptimos para su colonización futura. Se han formulado ya nuevos conceptos que podrían hacerlos accesibles, contando que el viaje hasta esos mundos remotos sería una empresa no de un grupo de astronautas, sino de colonias enteras, que emprenderían el viaje en las llamadas *naves generacionales*.

La fortuna favorece a los audaces

Los retos que se deberán afrontar para colonizar el sistema solar son numerosos y tienen distintos grados de dificultad. La ciencia ha imaginado soluciones que el progreso tecnológico ha de desarrollar y, aunque difícil, es posible superar los obstáculos ya identificados. Sin embargo, el arranque del proceso de expansión puede encontrar su mayor obstáculo en la voluntad del ser humano: ¿será

> ARCAS PARA EL ESPACIO PROFUNDO

Se conocen como *naves generacionales* una serie de propuestas hipotéticas de naves para los viajes interestelares. El principal obstáculo en este tipo de empresas sería la duración desmesurada del vuelo. El concepto de las naves generacionales supera esta dificultad cambiando las condiciones de la misión: los protagonistas no serían equipos de astronautas, sino generaciones de colonos, de manera que los tripulantes que verían el despegue pasarían el testigo a sus hijos o nietos. Para lograrlo, el diseño de las naves parte del de las estaciones espaciales futuristas, como el cilindro de O'Neill, que se suponen capaces de mantener la vida humana por tiempo indefinido, ya que contendrían un ecosistema equilibrado. Lo único que faltaría para lograr una nave generacional sería un sistema de impulso y de navegación, es decir, ser capaces de mover la enorme estructura mediante reactores nucleares, motores de materia-antimateria o cualquier otro sistema con la suficiente potencia.

— Representación artística del Proyecto Orión, una nave desarrollada por la NASA impulsada por un motor atómico, cuyo sistema de propulsión podría aplicarse a una nave generacional.

capaz de decidirse a dar el gran paso, el único que puede asegurar nuestra supervivencia a muy largo plazo, o se limitará a los confines de nuestro pequeño mundo azul?, ¿colonizaremos el sistema solar o nuestra existencia pasará desapercibida, a escala cósmica, como una breve chispa ignorada? Hemos de creer que el espíritu de expansión, exploración y aventura hará inevitable que, tarde o temprano, instalemos nuestra morada en esos mundos cada vez más al alcance de la mano, que nuestra ansia por perdurar nos empujará a llegar cada vez más lejos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Cox, Brian, Cohen, Andrew, *Maravillas del sistema solar*, Barcelona, Blume, 2012.

Hadfield, Chris, *Guía de un astronauta para vivir en la Tierra*, Barcelona, Ediciones B, 2014.

Luque, Bartolo, González, Álvaro, *Marte y vida, ciencia y ficción*, Madrid, Equipo Sirius, 2004.

Martos, Alberto, *Breve historia de la carrera espacial*, Ediciones Nowtilus, 2010.

Sagan, Carl, *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2007.

—, *Un punto azul pálido: una visión del futuro humano en el espacio*, Barcelona, Planeta, 2006.

Wolfe, Tom, *Elegidos para la gloria: lo que hay que tener*. Barcelona, Anagrama, 2010.

ÍNDICE

Agencia Espacial Europea (ESA) 21, 29, 100, 110, 119
agua líquida 9, 11, 120, 122-124, 127, 131
Apollo 16, 21, 33, 45, 88, 99
ascensor espacial 69-71, 110
asistencia gravitatoria 62-63, 65
asteroide 9, 21, 36, 67-69, 117
atrofia muscular 90
atrofia ósea 90

BIOS-3 98, 100
Biosfera 2 100, 109
blindajes 25, 33-34, 88, 96, 105, 110, 130

caída libre 93
Calisto 130
centrifugadora 94, 112
Ceres 50
Chang'e (programa) 31, 68
cilindro de O'Neill 113, 115, 135
cinturón de Asteroides 21, 117
cinturones de radiación 130
cinturones de Van Allen 96, 99, 110, 116, 128
cohete
  multietapa 45, 50
  nuclear 54
  químico 30, 46-47, 53, 55, 114, 116
colonia
  flotante 131-132
  orbital 109-110

Deep Space Gateway (DSG) 110, 114

delta-v 42-43, 56-62, 66-67, 110

ecosfera 108
ecosistema cerrado 98, 106, 108-109
efecto invernadero 9, 123, 132-133
efecto Oberth 61-63
empuje 42-43, 47, 49-52, 94, 125
Encélado 130-131
esfera de Bernal 113, 115
espaciopuerto 10, 110
estación espacial *Mir* 24, 34, 91, 100, 109
Europa 127-131

fisión nuclear 49
fuerzas de marea 128
fusión nuclear 37, 47-49, 114, 126

Ganímedes 130-131
GEO (órbita geoestacionaria) 35, 60-61, 69-70, 110
globo estratosférico 82, 84
Goddard, Robert 7, 41
gravedad artificial 48, 94, 113
helio-3 116, 126, 132

HEO (*high earth orbit*) 35
Herrera, Emilio 83
high elliptical orbit 35

impresión 3D 119, 121-122
impulso específico 42-43, 47, 50-51, 54
insuficiencia cardíaca 90
Io 128-130

Kalpana One 113
Kennedy, John F. 23
Koroliov, Serguéi 7, 23

LEO (*low earth orbit*) 32-33, 35, 56-57, 60-61, 109, 111

magnetosfera 96, 99, 110, 127-128, 130 -132
mal del espacio 78, 90
Mars500 100-101
MEO (*medium earth orbit*) 35
Mercurio 32, 61, 126
microgravedad 20, 79, 91-93, 95
Mimas 130
miopía por ingravidez 92
módulos hinchables 26, 112, 118
motor iónico 50-51, 53, 55
motor VASIMR 51, 54

Neptuno 21, 61, 65, 126, 132

océano subterráneo 130
O'Neill, Gerard K. 113
órbita de transferencia de Hohmann 59, 114
órbita en halo 66, 110
osteoporosis por desuso 91

paneles solares 19, 26-27, 37, 50, 52, 110
Pioneer 10 y *11* 21
plasma 10, 47, 51, 54
Plutón 61
puntos de Lagrange 64, 66-68, 110

radiación ionizante 95, 118-119, 132-133
radiación solar 10, 21, 85, 106, 122, 124
radiación ultravioleta 84, 95-96
rayos cósmicos 95-97, 99
reacción de Sabatier 107
reactor de núcleo gaseoso 48
Red de Transporte Interplanetario 67-69

Saturno 9, 21, 28, 61, 65, 67, 126, 128, 130-132
síndrome de Kessler 111
Skylab 19, 24
SLS (*space launch system*) 31, 114

terraformación 37, 133
Titán 9, 28, 131
tobera 42-43, 46-47, 51
toro de Stanford 113, 115
torre orbital 70
torrenteras marcianas 124
traje espacial 82, 84-88
transbordador espacial 21, 24
Tsiolkovski, Konstantín 7, 15, 17, 43, 70-71, 92

Urano 21, 61, 65, 126, 132

velero solar 52
velocidad de escape 56-57, 60, 65, 116-117
Venus 9, 53, 59, 61, 126, 132-134
Viking 1 y 2 8, 21, 29
Von Braun, Wernher 23, 31, 33
vuelo parabólico 78

zona de habitabilidad 122, 127, 134